



João Carlos Silva
Capão

**DESENVOLVIMENTO DE PAREDE INTERIOR
MODULAR EM PAINEL SANDWICH COM NÚCLEO
EM XPS**



**João Carlos Silva
Capão**

**DESENVOLVIMENTO DE PAREDE INTERIOR
MODULAR EM PAINEL SANDWICH COM NÚCLEO
EM XPS**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Miguel Nuno Lobato de Sousa Monteiro de Moraes, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e sob a coorientação científica da Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa, Professora Associada do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho às mulheres da minha vida e ao João Francisco, pelo incansável apoio.

o júri

presidente

Professora Doutora Maria Fernanda da Silva Rodrigues
Professora Auxiliar da Universidade de Aveiro

Professor Doutor Miguel Ângelo Carvalho Ferraz
Professor Auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

**Professor Doutor Miguel Nuno Lobato de Sousa Monteiro de
Morais**
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (orientador)

agradecimentos

Gostaria de agradecer aqui a todos aqueles que contribuíram para o meu sucesso, tanto neste trabalho como ao longo do curso.

Ao orientador e coorientador: Professor Miguel Morais e Professora Ana Velosa, respetivamente, pela orientação e conhecimentos transmitidos ao longo de todo o trabalho, assim como pelos conselhos nas alturas mais difíceis.

À Professora Fernanda Rodrigues do Departamento de Engenharia Civil de Aveiro, um especial agradecimento por todas as conversas, conselhos e também pela disponibilidade prestada.

À engenheira Célia Resende, pela amizade, disponibilidade em me ajudar e por todos os bons conselhos.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, que fizeram parte integrante da minha formação académica e pessoal.

A todas as minhas amigas de longa data, em especial à Sara, à Solange, à Mónica, à Cátia Vanessa, à Serenela e à Sílvia, por todo o apoio e carinho.

Aos meus amigos que fiz ao longo do meu percurso académico, em especial ao João Francisco, à Jéssica, à Violeta, ao Bernardo, à Cátia, à Rea, ao Hugo, ao Arruda, ao André e ao Zé por todos os bons momentos e apoio.

Às minhas avós, Maria, Rosa e Saudade e à minha tia Sandra por todo amor e sacrifícios que fizeram ao longo destes anos, e para que nada me faltasse.

Aos meus pais, pela oportunidade de me poder formar em Engenharia Civil na Universidade de Aveiro.

À Iberfibran, pela colaboração e material disponibilizado para o desenvolvimento dos protótipos.

palavras-chave

Painel sandwich, construção modular, parede autoportante

resumo

O objetivo desta dissertação é desenvolver uma parede autoportante com núcleo em XPS, baseado na construção de painéis sandwich, com a função de compartimentação vertical interior para casas de banho.

O seu desenvolvimento consiste em conceber e dimensionar os painéis sandwich, os materiais de revestimento do núcleo e as diferentes ligações entre os vários materiais e suporte. Com isto é pretendido diminuir os custos associados a tempo despendido e mão de obra, quando comparados a elementos construídos no local.

Os painéis foram modelados e estudados para solicitações em estado de serviço. Com este estudo, através da aplicação de limites normativos, nacionais e internacionais, estabeleceu-se uma solução possível, próxima da solução ótima.

Neste trabalho foram desenvolvidos protótipos e são apresentados desenhos pormenorizados dos painéis sandwich, incluindo os diferentes elementos que constituem as paredes de uma casa de banho.

keywords

Sandwich panel, modular construction, self-supporting wall

abstract

The objective of this dissertation is to develop a self-supporting wall with a XPS core, based on the construction of sandwich panels, with an interior vertical compartmentation function for bathrooms.

Its development consists of designing the sandwich panels, the core coating materials and the different connections between the various materials and support. It is intended to reduce the costs associated with time spent and manpower, when compared to elements built in the place.

The panels were modelled and studied for service requirement. With this study, through the application of normative limits, national and international, a possible solution was established, close to the optimal solution.

In this work prototypes have been developed and detailed drawings of the sandwich panels are presented, including the different elements that constitute the walls of a bathroom.

Conteúdo

ENQUADRAMENTO	1
1 Introdução	3
1.1 Enquadramento	3
1.2 Objetivo e metodologia da dissertação	6
1.3 Guia de Leitura	7
2 Estudo de Paredes Divisórias Interiores	9
2.1 Processos construtivos	9
2.1.1 Construção modular	9
2.1.2 Construção leve versus construção pesada	11
2.1.3 Pré-fabricação	12
2.1.4 Estruturas em aço leve	15
2.2 Quantificação de ações para paredes divisórias interiores	17
2.2.1 Ensaio para determinar a resistência ao impacto do corpo mole	18
2.2.2 Ensaio para determinar a resistência ao impacto do corpo duro	22
2.2.3 Cargas e limites de deslocamento impostos a paredes divisórias	25
2.3 Certificação de Qualidade	28
2.3.1 Marcação CE	28
2.3.2 Documento de Homologação	28
DESENVOLVIMENTO	31
3 Análise de uma Parede Divisória em XPS	33
3.1 Poliestireno extrudido	33
3.1.1 Aspectos gerais	33
3.1.2 O uso do XPS em paredes divisórias	35
3.1.3 Normas Requeridas ao XPS	36
3.1.4 XPS como parede divisória	37
3.2 Definição das propriedades mecânicas e físicas do painel em XPS	38
3.3 Simulação analítica do comportamento mecânico de um painel em XPS	39
3.4 Modulação numérica do painel em XPS	45
3.5 Comparação entre cálculo analítico e modulação em SAP2000	49
3.6 Considerações finais	49
4 Análise de uma Parede Divisória em Painel Sandwich com Núcleo em XPS	51
4.1 Descrição dos painéis sandwich	51

4.2	Materiais para as lâminas	52
4.2.1	MDF – Painel de fibra de madeira de média densidade.....	53
4.2.2	MGO – Painel de óxido de magnésio.....	54
4.2.3	OSB – Painel aglomerado de partículas longas e orientadas	55
4.2.4	PMC – Painel madeira-cimento	59
4.2.5	PGC – Painel gesso cartonado	61
4.3	Desempenho dos Painéis	62
4.3.1	Comportamento Acústico.....	63
4.3.2	Comportamento ao Fogo	69
4.3.3	Comportamento Térmico	78
4.3.4	Comportamento à Humidade	83
4.3.5	Durabilidade a longo prazo	85
4.3.6	Ensaio Normalizados a Painéis Sandwich	86
4.4	Análise estrutural.....	88
5	Solução Final e Realização de protótipos	95
5.1	Execução dos painéis sandwich.....	95
5.2	Materiais para montagem dos painéis sandwich e acabamento das juntas.....	96
5.3	Ligação entre painéis	99
5.4	Ligação dos painéis sandwich ao piso	103
5.5	Instalações Técnicas	106
5.6	Ligação do painel sandwich ao topo.....	107
5.7	Ligação dos painéis com aberturas	108
5.8	Aparafusamento do painel sandwich no topo e no piso	109
5.9	Análise económica de soluções para paredes divisórias	109
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	113
6	Conclusões e Perspetivas de Desenvolvimentos Futuros.....	115
6.1	Conclusões.....	115
6.2	Perspetivas de desenvolvimentos futuros	116
	Bibliografia	119
	Anexo A – XPS.....	127
	Anexo B – MDF	129
	Anexo C – MGO	131
	Anexo D – OSB.....	133

Anexo E – PGC	135
Anexo F – PMC	137

Acrónimos

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CE	Comissões de Estudo
CEE	Comissões de Estudo Especiais
DH	Documento de Homologação
EOTA	European Organisation for Technical Assessment
EPS	Poliestireno expandido (Expanded Polystyrene)
ETAG	Guidline for European Technical Approval
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LSF	Light Steel Framing
MDF	Medium Density Fibreboard
MGO	Painel de Óxido de Magnésio
MW	Lã Mineral (Mineral Wool)
ONS	Organismos de Normalização Sectorial
OSB	Orientated Strand Board
PGC	Painel de Gesso Cartonado
PMC	Painel de Madeira Cimento
PUR	Poliuretano
RECS	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços
REH	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação
RGEU	Regulamento Geral da Edificações Urbanas
RGSCIE	Regulamento Geral de Segurança Contra Incêndio em Edifícios
RH	Humidade Relativa
RRAE	Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios
SCE	Sistema Certificação Energética dos Edifícios
SVVIE	Sistemas Verticais Internos e Externos
UEATC	União Europeia para a Aprovação Técnica na Construção
UV	Ultra-violeta
XPS	Poliestireno Extrudido (Extruded Polystyrene)

Lista de Figuras

Figura 1 - Módulo de uma casa de banho em estrutura leve em aço. Adaptado [13]	11
Figura 2 – Tamanho teórico do saco de impacto utilizados nos testes de impacto. Adaptado [17].	18
Figura 3 – Exemplificação da montagem do impacto do objeto na vertical em que H = altura de queda, L = comprimento da corda e $\alpha = 65^\circ$. Adaptado [17].....	20
Figura 4 – Teste de impacto de um corpo duro num painel. Adaptado [17].	23
Figura 5 – Esquema de mão-francesa para ensaios de peças suspensas, como lavatórios e prateleiras. Adaptado [16].	27
Figura 6 - Célula para o fabrico de poliestireno extrudido. Adaptado [26]	34
Figura 7 – Exemplo de um autoclismo autoportante. Adaptado [31].	38
Figura 8 – Modelo simplificado de um painel em XPS com as incógnitas adotadas para as suas dimensões.	41
Figura 9 – Carga uniformemente distribuída ao longo do vão simplesmente apoiado.	42
Figura 10 – Representação da deformação da aplicação de uma carga uniformemente distribuída pelo vão simplesmente apoiado.	42
Figura 11 – Carga uniformemente distribuída aplicada num vão simplesmente apoiado até uma determinada distância “a” segundo a direção x.	42
Figura 12 – Carga pontual aplicada no meio do vão simplesmente apoiado.	43
Figura 13 – Momento aplicado num vão simplesmente apoiado.	43
Figura 14 –Painel em XPS modelado em SAP2000.	46
Figura 15 – Esquema representativo da aplicação de forças no painel em XPS com base no ensaio da mão-francesa, em corte transversal.	47
Figura 16 – Esquema representativo da divisão de uma carga pontual em três forças no painel em XPS, em corte transversal.	47
Figura 17 – Modelação do painel XPS em SAP2000 com três forças pontuais aplicadas..	48
Figura 18 – Exemplo de placas MDF. Adaptado [49].....	53
Figura 19 – Exemplo de placas de MGO. Adaptado [51]	54
Figura 20 – Exemplo de uma placa OSB. Adaptado [43]	56
Figura 21 – Exemplo de placas de PMC. Adaptado [60]	60
Figura 22 – Exemplo de painéis de gesso cartonado. Adaptado [63].	61

Figura 23 – Gráfico da Lei da Massa. Adaptado [66].	64
Figura 24 – Painel sandwich interior suportado no apoio inferior. Adaptado [27].	75
Figura 25 – Painel sandwich interior suspenso no apoio superior. Adaptado [27].	75
Figura 26 – Métodos de suspensão para painéis altos. Adaptado [27].	76
Figura 27 – Condutividade térmica λ [27].	79
Figura 28 – Transmissão de calor através de um material [27].	80
Figura 29 – Configuração do aparelho de teste à flexão pela norma EN 789. Adaptado [71].	87
Figura 30 – Configuração do aparelho de teste à flexão pela norma EN 310. Adaptado [71].	88
Figura 31 – Dimensões de um tipo de painel sandwich com lâminas finas. Adaptado [27].	90
Figura 32 – Painel sandwich simplesmente apoiado com uma carga linear distribuída uniformemente.	90
Figura 33 – Painel sandwich simplesmente apoiado com uma carga pontual aplicada a meio vão.	91
Figura 34 – Topo do painel sandwich modelado em SAP2000.	93
Figura 35 – Vista em planta do protótipo 1 (fase inicial).	99
Figura 36 – Fases de colagem dos revestimentos ao núcleo e aspeto final do protótipo 1.	100
Figura 37 – Pormenores de encaixe lateral entre painéis sem chanfro.	100
Figura 38 – Pormenores de encaixe lateral entre painéis com um chanfro.	101
Figura 39 – Pormenores de encaixe lateral entre painéis com dois chanfros.	101
Figura 40 – Vista em planta do sistema de encaixe macho-fêmea do protótipo 1 (fase final).	102
Figura 41 – Vista em planta de ligação em T dos painéis sandwich.	102
Figura 42 – Vista em planta de ligação de canto dos painéis sandwich.	103
Figura 43 – Vista lateral do protótipo 2 com um pormenor e respetivas medições.	104
Figura 44 – Vista frontal do protótipo 2 com um pormenor e respetivas medições.	104
Figura 45 – Aplicação dos perfis no núcleo e aspeto final do protótipo 2 (sem parafusos).	105
Figura 46 – Situações observadas no aparafusamento das lâminas ao perfil e núcleo.	105

Figura 47 – Perfis em U com chapa moldada para passagem de tubo de esgoto.	107
Figura 48 – Corte transversal da ligação do painel sandwich ao topo.	108
Figura 49 – Disposição dos painéis sandwich com uma abertura, com pormenor da padieira e da ombreira.	109

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens da construção pesada e leve. Adaptado [14].....	13
Tabela 2 – Soluções de elementos construtivos compatíveis com o sistema Steel Frame, em divisórias. Adaptado [14].	17
Tabela 3 – Impacto de corpo mole para vedações internas [16].	21
Tabela 4 - Valores a utilizar no teste de impacto do corpo mole em paredes interiores quanto à segurança no uso [17].	21
Tabela 5 - Valores a utilizar para os vários testes de impacto, para o corpo mole, em paredes interiores em manutenção [17].	22
Tabela 6 – Impactos de corpo duro para vedações verticais internas [16].	24
Tabela 7 – Valores a utilizar nos dois testes de impacto em paredes interiores quanto à segurança no uso [17].	25
Tabela 8 – Valores a utilizar para os vários testes de impacto, para o corpo duro, em paredes interiores em manutenção [17].	26
Tabela 9 – Propriedades mecânicas e físicas do painel em XPS. Adaptado [32].....	39
Tabela 10 – Resultados obtidos para uma carga pontual aplicada a meio vão para num painel em XPS.	44
Tabela 11 – Resultados obtidos para uma carga distribuída uniformemente em todo o vão de um painel em XPS.	44
Tabela 12 - Resultados obtidos para uma carga distribuída uniformemente a 1.20 m do solo num painel em XPS.	44
Tabela 13 – Resultados obtidos para um momento aplicado a meio vão de um painel em XPS.	45
Tabela 14 – Resultados obtidos da modulação do painel em XPS em SAP2000.	48
Tabela 15 – Referências bibliográficas para cada lâmina do painel sandwich.	53
Tabela 16 – Classes de duração de carga afetas à resistência da madeira de acordo com EC5. Adaptado [57].	59
Tabela 17 – Classificação dos painéis de gesso cartonado quanto à sua capacidade de absorção de água. Adaptado [63].	62
Tabela 18 – Valores mínimos da diferença padronizada de nível ponderada, DnT, w, entre ambientes. Adaptado [16].....	67

Tabela 19 – Influência da DnT, w sobre a clareza da fala, para ruído no ambiente interno em torno de 35 a 45 dB. Adaptado [16].	67
Tabela 20 – Valores da densidade das lâminas e massa dos painéis sandwich com núcleo em XPS.	68
Tabela 21 – Classes de reação ao fogo para produtos de construção, excluindo pavimentos [68].	70
Tabela 22 – Classes de resistência ao fogo padrão para produtos de construção. Adaptado [68].	71
Tabela 23 – Fatores de influência na classificação de desempenho de reação ao fogo para produtos de construção[68].	72
Tabela 24 – Densidades medias de carga de fogo por tipo de ocupação em edifícios. Adaptado [27].	74
Tabela 25 – Classe de desempenho ao fogo para cada diferente tipo de painel.	77
Tabela 26 – Classificação dos materiais de núcleo tendo como base o método EN 13823. Adaptado [16].	77
Tabela 27 – Valores de condutibilidade térmica e resistência térmica para cada material, e coeficiente de transmissão térmica para cada painel.	82
Tabela 28 – Classes de inércia para edifícios definidas pelo RCCTE.	82
Tabela 29 – Propriedades mecânicas (N/mm ²) para cada tipo de painel de face e respetiva norma.	89
Tabela 30 – Resultados obtidos para a deformação pela aplicação das equações segundo Davies (2001).	92
Tabela 31 – Resultados das deformações (m) obtidas em cada painel sandwich para cada tipo de aplicação de carga em SAP2000.	93
Tabela 32 – Fitas para tratamento de juntas e arestas vivas em painéis sandwich com faces em PGC. Adaptado [77].	97
Tabela 33 – Produtos de enchimento de juntas para painéis sandwich. Adaptado [81] e [82].	98
Tabela 34 – Custo (euros/m ²) por cada tipo de lâmina.	110
Tabela 35 – Preço total (euros /m ²) do painel sandwich com a respetiva lâmina e com o núcleo em XPS.	111

Parte I

ENQUADRAMENTO

1 Introdução

Neste capítulo introduzem-se sucintamente as temáticas e motivações que regem o desenvolvimento da presente dissertação. Abordam-se os objetivos gerais do trabalho e faz-se o enquadramento geral no contexto da predominância do uso de alvenaria em paredes interiores e a sua substituição por elementos pré-fabricados. Apresenta-se ainda um guia de leitura, destinado a esclarecer a estrutura adotada ao longo deste documento.

1.1 Enquadramento

As paredes são consideradas fundamentais no contexto do desempenho geral e da durabilidade dos edifícios, devido especialmente à função que exercem de vedação e proteção da envolvente do edifício no caso das paredes exteriores, e de compartimentação dos espaços interiores no caso das paredes interiores. Acresce, ainda, o facto das referidas paredes representarem uma parcela considerável do custo total do edifício [1].

Desde a antiguidade que a construção de abrigos permanentes para os humanos, está, na maior parte das civilizações, associada à alvenaria. No que respeita às paredes de compartimentação interior presentemente em Portugal, há predominância da aplicação de tijolos cerâmicos de furação horizontal de 7, 9 ou 11 centímetro, ocorrendo as espessuras maiores nas paredes das casas de banho e cozinhas, atendendo à necessidade de embutir nessas paredes um maior número de instalações. Por requisitos acústicos e eventualmente térmicos, as paredes de separação de fogos e de confrontação com zonas comuns são mais cuidadas, sendo com frequência duplas, com isolamento acústico no seu interior [2].

As alvenarias de tijolo, desde que concebidas e executadas de acordo com os códigos e regras construtivas adequados, são capazes de desempenhar um papel resistente e higratérmico apropriado, mesmo em condições adversas de funcionamento. Há uma exigência de mão de obra qualificada, associada à dificuldade de integração e compatibilização dos vários elementos construtivos (zona corrente da parede, revestimento exterior e pontos singulares) e à complexidade da execução no caso da parede dupla. Adicionalmente, a ausência de sistematização de produção nacional de acessórios e elementos para a resolução de pontos singulares das paredes duplas origina situações de imprevisto e deficiente qualidade construtiva [3].

Uma alternativa ao uso de paredes interiores em alvenaria é a aplicação do sistema *Light Steel Framing* (LSF). Este sistema foi aplicado em grande escala em 1980 nos Estados Unidos, altura em que o preço da madeira aumentou de tal forma, que os construtores tiveram a necessidade de adotar o aço galvanizado como substituto estrutural [4]. LSF é uma designação utilizada internacionalmente para descrever um sistema construtivo que utiliza o aço galvanizado como principal elemento estrutural. São estruturas que não utilizam ligantes físicos (à base de cimento, por exemplo), tijolos ou blocos tradicionais, sendo que o betão é apenas empregue nas fundações ou caves. Em Portugal, o sistema também é conhecido por “Estruturas em Aço Leve”, “Construção LSF” ou “Construção com Aço Galvanizado”. Apresentando-se competitivo relativamente à construção tradicional, principalmente, para pequenos vãos, adicionalmente, o baixo peso dos perfis de aço galvanizado que o LSF utiliza, aliado à sua grande resistência mecânica do sistema construtivo, permitem conjugar esta utilização com as estruturas tradicionais em betão ou aço estrutural em edifícios complexos ou de grande altura, onde o sistema não poderia, por si só, satisfazer os requisitos de resistência. Para além de permitirem o aligeiramento dos edifícios, alguns componentes estruturais secundários podem ser realizados com o sistema LSF e contribuirão para a resistência estrutural do conjunto [5]. Um dos fatores que torna o LSF menos atrativo é o elevado preço da mão-de-obra. Na verdade, os técnicos e empresas de construção estão habituados a utilizar as tradicionais estruturas de alvenaria e betão, não se encontrando habilitados/vocacionados a trabalhar com outro tipo sistema estrutural. Por outro lado, os poucos técnicos que têm formação, por se tratar de mão de obra especializada, cobram valores elevados na construção de habitações em LSF, aumentando assim substancialmente o valor final da construção [4].

Atualmente, o setor da construção civil representa um elevado impacto no consumo de energia, quer ao nível da produção dos materiais de construção quer ao nível do consumo de energia para aquecimento e arrefecimento no interior de edifícios de habitação e edifícios públicos. Este setor é responsável pela produção de 50% dos resíduos acumulados em aterros, pela produção de 30% das emissões de dióxido de carbono para a atmosfera e por 40% do consumo de energia total anual. Deste modo, existe a necessidade de encontrar soluções que conduzam a uma construção mais sustentável, que em parte pode ser alcançado com a utilização de novos materiais mais eficientes do ponto de vista económico e ambiental [6].

Estes factos levantam três questões relevantes. Por um lado, que tipo de sistema construtivo é capaz de substituir as paredes interiores de alvenaria, garantindo ou melhorando as condições de conforto que destas é possível obter? Por outro lado, qual será a combinação ideal de materiais para esta solução? E por fim, será que esta solução conduz a uma construção mais sustentável? A conjugação destas questões constitui, a vários níveis, a principal motivação do trabalho aqui apresentado, estando na origem da apresentação de vários materiais de construção em conjunção com a definição de um sistema estrutural capaz de se suportar e resistir a solicitações adversas.

A solução que será apresentada e que é objeto de estudo da dissertação, centra-se no conceito de construção modular. Este tipo de construção caracteriza-se pela normalização dimensional, repetição e uniformização de processos e materiais, com vista à melhoria e eficiência produtiva. Este princípio pode ser aplicado quer na construção tradicional, quer na construção industrial. A pré-fabricação surge associada a esta última, já que o que a distingue não é a normalização de processos ou o seu nível de organização, mas sim a ferramenta com que é realizada e a mecanização da produção [7].

Para o desenvolvimento de um sistema pré-fabricado é necessário ter em conta um conjunto de normas, não só aplicadas ao próprio elemento, mas também aos subelementos que o constituem. Com isto, surge outra questão relevante. Quais são as normas que se aplicam ou estão sujeitas a um elemento vertical interior pré-fabricado? Em Portugal, encontram-se em vigor normas, das quais, três são essenciais nas construções nacionais, com incidência mais ao menos significativa sobre a envolvente opaca vertical dos edifícios. Os requisitos que visam assegurar a proteção contra o ruído são especificados no *Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios* (RRAE) [8], o *Sistema Certificação Energética dos Edifícios* (SCE) [9], que integra o *Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação* (REH), e o *Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços* (RECS), que visam dar satisfação às exigências de economia de energia assegurando também, condições de referência de conforto térmico interior e o *Regulamento Geral de Segurança Contra Incêndio em Edifícios* [10] (RGSCIE) que para além de outros aspetos técnicos e do carácter unificador que apresenta em relação à diversidade existente, introduz as classificações europeias de reação e resistência ao fogo dos produtos e dos elementos de construção, com o objetivo de contribuir para a segurança dos edifícios em caso de incêndio [11].

1.2 Objetivo e metodologia da dissertação

A presente dissertação tem como principal objetivo desenvolver um painel sandwich autoportante, em que o seu núcleo é constituído por XPS (poliestireno extrudido). Um painel sandwich é um elemento composto por duas faces e um núcleo. Neste caso, o material selecionado para servir de núcleo é o XPS, caracterizado como um bom isolamento térmico. As faces no painel sandwich têm como função aumentar a rigidez e servir de proteção ao núcleo, devido aos esforços solicitados (cargas suspensas, por exemplo) ou a ações externas, como o fogo. O XPS é um material inflamável e esta condição deve ser tida em conta quando se pretende usar como um material com a face à vista.

Pelo facto do painel sandwich se tratar de um elemento modular, a conceção e montagem do painel sandwich é feita em fábrica e depois transportado para o local pretendido. Pretende-se com isto reduzir os custos e o tempo de construção de paredes divisórias quando comparados com a estruturas de alvenaria ou com sistemas de construção leve realizados em obra.

Para o desenvolvimento desta dissertação foi concretizado um estudo bibliográfico sobre as características gerais dos painéis sandwich incluindo, nomeadamente, as diferentes tipologias existentes, os principais materiais constituintes e ainda o seu desempenho em serviço (comportamento acústico, térmico e em situação de incêndio). Além disto, foi feita uma pesquisa sobre as normas aplicáveis aos painéis em causa, incluindo legislação nacional e internacional que se encontram em vigor até à data de concretização da presente dissertação.

Paralelamente ao estudo bibliográfico, a dissertação inclui ainda o estudo dos modelos analíticos que permitem realizar o dimensionamento estrutural dos painéis em serviço. Neste estudo, procura-se avaliar o efeito do material de núcleo no desempenho dos painéis tendo, para isso, sido estudado individualmente sujeitando-o a diversos tipos de carga com o objetivo de simular diferentes situações a que um painel está sujeito no seu estado de serviço. O mesmo estudo foi aplicado a diferentes painéis sandwich, constituídos pelo mesmo núcleo, com vários materiais aplicados em ambas as faces. Estes materiais foram selecionados tendo em consideração o estudo realizado e a disponibilidade dos mesmos no mercado português.

Além destes estudos, foram desenvolvidos protótipos dos painéis sandwich com o objetivo de melhorar as ligações entre estes. São apresentados ainda desenhos de pormenorização da solução final do painel sandwich.

1.3 Guia de Leitura

Pretende-se que este documento possa fornecer uma base introdutória para algumas das temáticas aqui tratadas. Incluindo algumas considerações fundamentais sobre as diversas áreas, de modo a permitir uma compreensão sucinta e sustentada. Na elaboração deste trabalho, optou-se por uma divisão definida em seis capítulos, encontrando-se distribuídos por três partes principais da estrutura global da dissertação.

No presente capítulo, é feita uma breve introdução ao tema abordado, inserindo-o no contexto da engenharia civil, apresentam-se os objetivos e metodologia adotada neste trabalho e o respetivo guia de leitura.

No segundo capítulo, são apresentados processos de construção relativamente à conceção de paredes divisórias interiores sem função estrutural. É ainda apresentada a quantificação de ações necessária para o seu dimensionamento e exigências relativas à certificação de qualidade.

No terceiro capítulo, é apresentado o estudo analítico e numérico do comportamento de uma parede divisória em XPS, com base na teoria das vigas, onde é feito um levantamento de expressões analíticas para o dimensionamento em estado limite de serviço. Além disto, são apresentados aspetos gerais do XPS, incluindo o seu uso em paredes divisórias e normas aplicáveis a este material. É realizado um estudo analítico e numérico do XPS com função de parede divisória sujeita a diversas cargas horizontais e é feita uma comparação entre estes resultados.

No quarto capítulo, é apresentado o estudo de uma parede divisória em painel sandwich com núcleo em XPS, com cinco tipos diferentes de lâminas. Este estudo incluiu a definição e caracterização das lâminas para o painel sandwich, o desempenho que se pretende obter face ao comportamento para as diversas solicitações. É realizado um estudo analítico e numérico dos painéis sandwich, tendo sido feita a comparação entre os resultados.

No quinto capítulo, são apresentados colas e materiais de acabamento para os diferentes painéis sandwich e os protótipos do painel sandwich com função de parede divisória interior que foram desenvolvidos em laboratório e têm como objetivo mostrar detalhes construtivos. É ainda apresentado um estudo económico para o preço do painel por cada m² e comparado com soluções construtivas existentes.

Por fim, no sexto capítulo, são apresentadas as conclusões do trabalho realizado e aspetos que se consideram passíveis de serem desenvolvidos em estudos futuros.

2 Estudo de Paredes Divisórias Interiores

No presente capítulo, são apresentados conceitos base para a compreensão e desenvolvimento do presente trabalho. Inicialmente, são apresentados processos de construção relativamente à conceção de paredes divisórias interiores sem função estrutural. Depois é apresentada a quantificação de ações necessária para o seu dimensionamento. E por fim, são apresentadas exigências relativas à certificação de qualidade.

2.1 Processos construtivos

Neste subcapítulo definem-se conceitos da temática construção leve e faz-se a comparação entre esta e a construção pesada.

2.1.1 Construção modular

A construção modular pretende, através da uniformização das dimensões dos componentes, racionalizar todo o processo de construção, desde a fase de projeto até à montagem final.

Na fase de projeto a racionalização ocorre na agilização de procedimentos, pois executar uma planta ou projeto novo será um processo mais rígido e menos personalizável. Este terá como base o recurso a elementos predefinidos e pré-calculados, tornando-se assim o projeto, de uma forma resumida, numa definição da disposição dos elementos entre si e no meio que o rodeia, tendo subjacente uma malha quadriculada modular. Este facto resulta também numa economia de custos inerentes à consideração habitual, personalização de cada habitação, que exige *a priori* um estudo detalhado sobre a habitação a construir.

Consequentemente, o processo de construção é executado em duas fases distintas. Inicialmente, os elementos que constituem o sistema são produzidos em fábrica, e posteriormente, são transportados e montados na local de implantação. O recurso à produção em série poderá resultar numa diminuição de custos, para além de possibilitar a adoção de sistemas de controlo da qualidade mais eficazes, permitindo o aumento qualitativo individual das peças. O processo de montagem implica por norma um grande dispêndio de mão de obra, que poderá ser severamente diminuído se os elementos construtivos tiverem mecanismos de montagem simplificados, sem necessidade de cortes, sobreposições ou qualquer tipo de

alteração à sua morfologia inicial. Ou seja, poderão obter-se ganhos significativos na eficiência global do sistema, refletindo-se no custo final da habitação, na sua qualidade e no tempo de construção [12].

A construção modular permite a possibilidade ou não de acrescentar módulos à habitação já existente. Pode ser classificada como um sistema aberto, parcialmente aberto, fechado, misto e construtivo de elementos modulares. Neste sistema, o módulo não é definido como uma caixa, apenas apresenta a denominação de modular, porque os elementos são construídos em fábrica e apresentam dimensões padronizadas, que têm como objetivo a rápida montagem em obra [13].

Os benefícios da pré-fabricação fora do local e a melhoria da qualidade de produção está a ser aplicada em edifícios residenciais, para projetos comerciais/habitacionais mistos, na educação e no setor de edifícios de saúde. As características do mercado que influenciam a escolha da construção modular são:

- Poupança de recursos através de economia de escala;
- Velocidade de construção;
- Alto nível de controlo de qualidade;
- Adaptabilidade para futuras extensões.

Os seguintes tipos de módulos podem ser usados na construção de edifícios em que a construção modular é feita na sua totalidade ou através do auxílio de construção em aço:

- Módulos de 4 lados;
- Módulos parcialmente abertos;
- Módulos de face aberta com suporte de canto;
- Módulos suportados por uma estrutura primária;
- Módulos sem suporte de carga (módulos unitários);
- Módulos mistos;
- Módulos especiais de especiais de escadas ou elevadores.

Os módulos sem suporte carga são de certa forma semelhantes a unidades totalmente modulares, mas são projetados para resistir a cargas externas, exceto o seu próprio peso e a forças exercidas durante o seu transporte. A estrutura deste módulo é mais leve que a da construção totalmente modular, mas deve ser suficientemente rígida para resistir às forças

durante a instalação. As paredes e o piso são relativamente finos (normalmente <100mm) [13].



Figura 1 - Módulo de uma casa de banho em estrutura leve em aço. Adaptado [13]

2.1.2 Construção leve versus construção pesada

Nas edificações as paredes podem adquirir várias denominações consoante a sua localização e função no edifício. Caso se localizem no interior do edifício têm função de compartimentação entre espaços. Caso se localizem na envolvente do edifício, poderão ser paredes de fachada, caso tenham a função de separação do espaço interior do exterior, ou de empena se forem construídas no limite da propriedade, visando confrontar com outras construções.

As paredes também podem desempenhar função estrutural, sendo designadas como resistentes caso se destinem a suportar a generalidade das cargas da construção, ou não resistentes no caso de não possuírem capacidade para suportar cargas. Além disso, devem também possuir características que lhes permitam satisfazer com sucesso as funções a que se destinam, como garantir a segurança e estabilidade estrutural, a segurança contra incêndio, contra as intrusões de animais ou pessoas, devem permitir a suspensão de equipamentos pesados, ser estanques ao ar e à água, ser confortáveis térmica, acústica e visualmente, ter durabilidade e custos de manutenção aceitáveis e não devem possuir produtos tóxicos.

Existem inúmeras soluções construtivas para realizar paredes que vão desde a construção atual, à base de estrutura porticada de betão armado e enchimento dos pórticos com alvenaria de tijolo furado, podendo a parede ser simples, composta, ou dupla com caixa

de ar. A construção pré-fabricada por sua vez se subdivide em construção pré-fabricada pesada e leve, consoante a massa do elemento/componente da construção, para além da construção das próprias paredes em betão.

Em Portugal cerca de 90% dos edifícios habitacionais são realizados em betão armado, no entanto é sabido que este tipo de construção nem sempre é o mais adequado sob o ponto de vista económico e que inclusivamente tem estado na origem de muitas das anomalias nas construções. Neste momento não está estabelecido por nenhum organismo ou entidade oficial o que define se um dado elemento é considerado leve ou pesado [14].

Um estudo realizado por Vítor Pinto [14], com o objetivo de comparar uma construção pesada com uma construção leve, partiu de um projeto de uma habitação já existente em estrutura reticulada de betão armado (construção pesada), e procedeu ao cálculo do seu peso por metro quadrado de pavimento. Utilizando o mesmo projeto de arquitetura fez o mesmo estudo de quantificação do peso da construção por metro quadrado de pavimento, mas supondo que as paredes e pavimentos eram materializados por uma solução em construção leve com estrutura metálica revestida por materiais utilizados frequentemente em construções leves. Conclui que, uma construção corrente pode atingir uma massa de cerca de 900 a 1000 kg/m² e a mesma habitação construída em sistema de construção leve pode apresentar uma massa por metro quadrado de pavimento a rondar os 150 kg/m². O que revela uma diferença de 6 a 7 vezes no peso da construção de um sistema para o outro. Com isto, foram estabelecidas vantagens e desvantagens para cada tipo de construção, apresentadas na Tabela 1.

2.1.3 Pré-fabricação

Pelo facto de o objetivo da presente dissertação ser o desenvolvimento de soluções para paredes divisórias em painéis, torna-se necessário fazer uma descrição neste subcapítulo sobre a pré-fabricação. Tendo em conta a industrialização da construção, os sistemas disponíveis, de que modo poderá a pré-fabricação contribuir para o desenvolvimento de divisórias em painéis e as vantagens e inconvenientes das mesmas.

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens da construção pesada e leve. Adaptado [14]

Tipo de construção	Vantagens	Desvantagens
Pesada	Inércia térmica elevada;	Tempo de construção mais demorado;
	Bom isolamento acústico;	Custos tendencialmente mais elevados de construção;
	Economia na utilização sob o ponto de vista das necessidades de aquecimento;	Baixo controlo da qualidade dos materiais;
	Melhor conhecimento das soluções pelos profissionais do setor;	Dificuldades na industrialização do setor;
	Maior controlo normativo nas soluções.	Complexidade das soluções;
		Surgimento de variadas anomalias;
		Impacte ambiental elevado.
Leve	Impacte ambiental mais reduzido;	Custos de utilização, sob o ponto de vista das necessidades de aquecimento, potencialmente elevados;
	Maior economia na construção de edifícios;	Mau isolamento acústico;
	Simplicidade construtiva;	Baixo nível de conhecimento das características de muitas das soluções;
	Ausência de muitas das anomalias conhecidas na construção;	Necessidade de mão de obra especializada;
	Facilita a industrialização do setor;	Maior necessidade de manutenção.
	Bom desempenho dos edifícios em caso de sismo;	
	Facilidade na manipulação e transporte dos materiais;	
	Elevado controlo dos materiais em fábrica.	

Atualmente, verifica-se um aumento dos preços dos materiais de construção acompanhado de um forte acréscimo das despesas com a mão de obra, que está em consonância com o aumento da qualidade de vida da população. Isto causa, portanto, um aumento dos preços da construção, o que faz com que exista a necessidade de procurar

reduzir os custos da construção através de novos métodos construtivos, apoiados na industrialização do sector da construção, aumentando assim a capacidade de produção através do aumento da sua eficiência. Trata-se de um conjunto de estratégias que procuram otimizar o sector da construção aproximando-o dos modelos de gestão das estruturas fixas produtivas. A industrialização atinge-se, essencialmente, através de três vias fundamentais, a pré-fabricação, a racionalização da construção e a mecanização:

- A pré-fabricação define-se como sendo uma forma de fabrico industrial, fora do local da obra, de elementos que depois são transportados para o local da obra e utilizados na construção sob distintas formas de montagem;
- A racionalização da construção caracteriza-se por um conjunto de atitudes que visam aumentar a produtividade global através do aumento da produtividade de cada uma das suas tarefas elementares;
- A mecanização da construção procura obter os resultados anteriores, ou seja, o aumento da produtividade, por via da substituição de parte da mão-de-obra, por máquinas.

Por sua vez, este conceito volta a subdividir-se, para melhor conseguir acomodar as diferenças significativas entre os vários tipos de pré-fabricação, existindo assim, a pré-fabricação pesada, quando os seus elementos ou componentes têm peso significativamente elevado, normalmente peças de betão armado de grandes dimensões; a pré-fabricação leve quando os elementos apresentam peso reduzido e estão sujeitos a pequenas operações de montagem no local da obra, e o recurso a argamassas é mínimo; e a pré-fabricação ligeira quando se empregam em obra elementos fabricados fora do local da obra, que são posteriormente colocados em obra através de técnicas específicas para cada componente.

Além disso, (pré-fabricação) pode ser total, no caso de a obra ser realizada recorrendo a elementos/componentes fabricados noutra local e mais tarde transportados e colocados em obra, ou parcial, caso coexistam partes da obra em elementos pré-fabricados e outros em construção tradicional efetuados em obra. Tem também como objetivo, a diminuição dos custos da construção, e ao mesmo tempo coloca o sector da construção em linha com as restantes indústrias. É também uma forma de construir que alguns profissionais do sector consideram que vai de encontro às tendências para o futuro com a redução dos tempos de construção em obra e um aumento do cuidado com a execução do projeto, dada a necessidade

de rigor que este tipo de construção impõe aos projetos, problema que aqueles que defendem esta forma de construir relativizam, dado existir já uma tendência no sector de aumento do rigor dos projetos no futuro. Em comparação com a construção dita corrente, em que os diversos elementos de um edifício são produzidos no próprio local da obra, esta pode representar uma mais valia em termos de uma redução dos custos de produção.

A pré-fabricação não apresenta apenas vantagens. Na realidade também existem alguns inconvenientes importantes que muito têm contribuído para a sua não aceitação por parte dos profissionais que operam no sector. Um dos problemas mais importantes é o facto de concentrar todas as fases do ciclo produtivo no âmbito do sistema construtivo (projeto, construção e montagem). Ou seja, concentrando, nas empresas de pré-fabricação, funções que não lhes são próprias e deixando um pouco à margem projetistas e as outras empresas, que passam a olhar a pré-fabricação com uma certa negatividade. Por um lado, os projetistas, porque não conhecem bem a técnica do sistema no qual o seu projeto será executado e o seu projeto estará condicionado pelas limitações do sistema. E outro, as empresas construtoras, porque esperavam resolver na pré-fabricação os problemas do custo da construção corrente, mas ao serem quase excluídas do ciclo produtivo acabam por ver na pré-fabricação um concorrente. Outro obstáculo à proliferação da pré-fabricação está relacionado com a inércia em evoluir dos profissionais do sector, como arquitetos, engenheiros e empresas construtoras que continuam a conceber e a construir utilizando as tecnologias que já dominam [14].

2.1.4 Estruturas em aço leve

O sistema de construção *Light Steel Framing* (LSF), caracteriza-se por abordar e colmatar, de forma eficaz, as lacunas ecológicas existentes com outros materiais, utilizando materiais com ciclos de vida mais sustentáveis. Nesse sentido, é da maior importância o estudo e análise da performance das várias vertentes deste sistema construtivo, averiguando a sua aplicabilidade em diferentes tipos de edifícios [15].

Existem variados métodos disponíveis no mercado para o fabrico de perfis enformados a frio de aço leve galvanizado. Consoante a dimensão da empresa produtora, estes métodos podem adquirir uma vertente mais ou menos industrializada. Como principais vantagens, este sistema de produção elimina os desperdícios provenientes de cortes, já que quando uma peça é cortada segue imediatamente a produção da seguinte e como desperdícios

só existem os resultantes das furações e da chapa restante do desbobinador. A montagem em obra das construções que utiliza a tecnologia em aço leve galvanizado segue essencialmente três métodos construtivos, o método da construção em estaleiro, a construção por painéis e a construção modular. A construção em estaleiro é o método construtivo adotado na generalidade das obras correntes e também nas obras em aço leve galvanizado, em Portugal. Neste método, a maior parte das tarefas associadas ao processo construtivo são efetuadas em estaleiro, como o corte dos perfis metálicos, a sua colocação, a aplicação dos painéis, a execução das treliças, entre outras tarefas. Este tipo de método construtivo pode ser utilizado em condições onde a pré-fabricação não é viável. Tem como principais vantagens, a dispensa por parte do construtor da existência de um local para a pré-fabricação do sistema e a facilidade de transporte das peças para o local da obra.

No caso da construção por painéis, as estruturas metálicas das paredes, lajes, coberturas, entre outras poderão ser montadas em fábrica, transportadas e montadas no local da obra, bem como alguns dos materiais de preenchimento e algum do isolamento térmico, contribuindo assim para a redução das tarefas a executar em obra. Em obra, os painéis são conectados uns aos outros, através de parafusos. As principais vantagens deste método construtivo são, a velocidade de montagem, o maior controlo de qualidade que é possível implementar na produção dos painéis, a minimização das tarefas em estaleiro e o aumento da precisão dimensional, devido às condições mais propícias em fábrica.

Por último, o método construtivo modular tem por base um sistema de módulos pré-fabricados, totalmente montados e acabados em fábrica, com todos os revestimentos também executados em fábrica e que são posteriormente transportados e colocados no local da construção ao lado uns dos outros ou em andares formando no seu conjunto o edifício. Ao saírem de fábrica já acabados, incluindo as instalações elétricas ou hidráulicas montadas, resta apenas, para o local da obra, efetuar as ligações entre eles e as redes públicas. Este método construtivo obriga a que exista um espaço em fábrica, a que se tenha em atenção o meio de transporte a utilizar aquando da opção das dimensões dos módulos, mas apresenta uma rapidez de execução da obra que em alguns casos poderá mesmo ser de apenas alguns dias [14].

Na Tabela 2 são apresentadas várias soluções de elementos construtivos com o sistema *Steel Frame*, aplicado a paredes divisórias. Sendo que, a solução mais corrente em Portugal

é a estrutura metálica simples em aço leve galvanizado, com o revestimento em painéis de gesso cartonado em ambas as faces e com isolamento acústico/térmico no interior.

Tabela 2 – Soluções de elementos construtivos compatíveis com o sistema Steel Frame, em divisórias. Adaptado [14].

Solução	Caracterização
Placas de gesso cartonado	Estrutura autoportante simples de perfis de aço galvanizado, formada por montantes verticais e canais horizontais em módulo; Fixação aparafusada de um ou mais painéis de gesso cartonado de variadas espessuras em ambas as faces da estrutura; Tratamento das juntas com argamassa e fita para juntas; Acabamento superficial variado.
Placas de fibrocimento	Estrutura autoportante simples de perfis de aço galvanizado, formada por montantes verticais e canais horizontais em módulo; Fixação aparafusamento de um ou mais painéis de cimento Portland de variadas espessuras em ambas as faces da estrutura; Tratamento das juntas com argamassa e fita para juntas; Acabamento superficial variado.
Placas de resinas termoendurecidas	Estrutura autoportante simples de perfis de aço galvanizado, formada por montantes verticais e canais horizontais em módulo; Sistema de fixação oculta; Painéis de resinas termoendurecidas.
Cerâmica e placas autoportante	Pano de tijolo cerâmico com furação simples de grande formato assente com argamassa; Revestimento em ambas as faces por painéis de gesso cartonado; fixados por colagem com argamassa estendida por toda a parede.

2.2 Quantificação de ações para paredes divisórias interiores

Neste subcapítulo descrevem-se ensaios normalizados para paredes interiores com função não estrutural e cargas e limites de deslocamento impostos a paredes com função de divisória.

Os Relatórios Técnicos da EOTA são desenvolvidos como documentos de referência de apoio às Diretrizes de Aprovação Técnica Europeia e também podem ser aplicáveis a um Entendimento Comum de Procedimentos de Avaliação, a um Documento de Compreensão da EOTA ou uma Aprovação Técnica Europeia. A caracterização dos ensaios que são descritos a seguir são com base num relatório técnico da EOTA com base na ISO/DIS 7893 e são também apresentados critérios utilizados em normas brasileiras, baseadas em normas britânicas.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é o Foro Nacional de Normalização. As Normas Brasileiras, cujo conteúdo é de responsabilidade dos Comitês Brasileiros (ABNT/CB), dos Organismos de Normalização Setorial (ABNT/ONS) e das Comissões de Estudo Especiais (ABNT/CEE), são elaboradas por Comissões de Estudo (CE), formadas por representantes dos setores envolvidos, delas fazendo parte: produtores, consumidores e neutros (universidade, laboratório e outros) [16].

2.2.1 Ensaio para determinar a resistência ao impacto do corpo mole

O teste de impacto do corpo mole simula um impacto resultante de uma pessoa a cair acidentalmente contra a parede. O corpo mole, em laboratório, é largado de uma altura, criando uma energia de impacto, que corresponde à energia de impacto provocada pela pessoa. O teste é realizado com referência à segurança no estado de serviço [17].

O aparelho a usar neste teste de ser um saco (Figura 2) de lona esférico de 400 mm (± 40) preenchido com esferas de vidro de 3.0 mm (± 0.3) de diâmetro até perfazer um peso total de 50 kg (± 0.5).

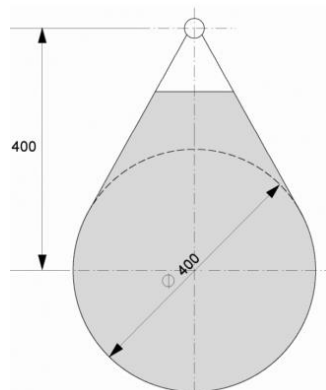


Figura 2 – Tamanho teórico do saco de impacto utilizados nos testes de impacto. Adaptado [17].

- Resistência de impacto no estado de serviço

O ensaio deve ser realizado num conjunto de três testes com a mesma energia e no mesmo ponto de impacto. Se se pretender diferentes tipos de energias aplicadas é necessário um conjunto de testes para cada energia de impacto.

- Preparação do ensaio

Os painéis devem ser montados de acordo com as especificações de instalação do fabricante, com relação ao uso pretendido, para que o ensaio simule as condições de uso final. A maneira pela qual as componentes são fixadas entre elas, deve reproduzir as condições reais de uso, particularmente em relação à natureza, tipo e posição das fixações e a distância entre elas. Se as especificações do fabricante preverem mais de um conjunto possível de uso final, o organismo de aprovação deve efetuar o ensaio mais desfavorável. O fabricante tem a possibilidade de testar montagens adicionais, se alegar melhor desempenho. Por definição, a montagem mais desfavorável deve ser a distância máxima entre suportes ou o maior comprimento em relação à altura com espessura mínima.

- Procedimento do ensaio

Neste ensaio, o corpo de impacto, com massa (m) é largado de uma altura (H), para que a energia de impacto total ($E = g \times H \times m$) corresponda a uma das seguintes energias, E (Nm): 60, 100, 120, 130, 200, 240, 300, 400, 500, 600, 700, 900 e 1200, com aceleração da gravidade, $g = 9,81\text{m/s}^2$.

A altura (H) é medida entre o ponto de impacto designado e a altura em que é libertado. O ângulo deve ser inferior ou igual a 65° . O saco é mantido na vertical quando é libertado, como mostra a Figura 3, e não na horizontal.

- Expressão dos resultados dos testes

O resultado do teste é aprovado/reprovado, dependendo se o conjunto dos painéis satisfazem os seguintes critérios.

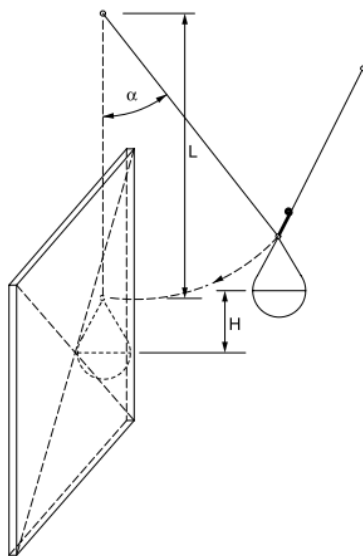


Figura 3 – Exemplificação da montagem do impacto do objeto na vertical em que H = altura de queda, L = comprimento da corda e $\alpha = 65^\circ$. Adaptado [17].

Para a segurança em uso:

- sem colapso: o resultado do teste é favorável quando, após o teste, o painel ou o conjunto mantém a sua integridade mecânica e ainda é capaz de carregar o seu próprio peso na posição testada.
- ausência de penetração: o resultado do teste é favorável quando, após o teste, o saco de impacto não passou através do painel.
- sem projeção: o resultado do teste é favorável quando, após o teste, o saco de impacto não criou partes do painel (por exemplo, núcleo, face, reforço) para projetar a partir da face do painel, criando arestas cortantes ou superfícies afiadas que possam causar ferimentos.

Para a Manutenção:

- ausência de penetração: o resultado do ensaio é favorável quando, após o ensaio, o saco de impacto não penetrou na face do painel no lado de impacto da amostra.
- sem degradação: o resultado do teste é favorável quando, após o teste, não houver fissuras a olho nu, depressões, protuberâncias ou quaisquer outros defeitos nos materiais, que possam influenciar adequação ao uso do painel ou montagem. As deformações, que apenas influenciem a aparência são permitidas, mas têm de ser mencionadas no relatório de ensaio. Em serviço, a deformação residual após cada ensaio deve ser registrada passados 5 minutos do impacto (em mm).

Na Tabela 3, para vedações internas sem função estrutural, são apresentados valores de energia de impacto provocados pelo objeto de impacto e os seus respectivos limites quanto ao desempenho que é permite observar para obterem aprovação. Estes limites são propostos pela ABNT NBR 15575-4 [16].

Tabela 3 – Impacto de corpo mole para vedações internas [16].

Elemento	Energia de impacto de corpo mole (Nm)	Critério de desempenho
Vedações sem função estrutural	120	Não ocorrência de ruína (estado limite último); São admitidas falhas localizadas.
	60	Não ocorrência de falhas (estado limite de serviço); Limitação da ocorrência de deslocamento: $d_h \leq L/125$ $d_{hr} \leq L/625$
Em que d_h corresponde a deslocamentos horizontais e d_{hr} corresponde a deslocamentos horizontais residuais.		

Na Tabela 4 e na Tabela 5, são apresentados os valores a utilizar no ensaio do corpo mole quanto à sua solicitação propostos pelo relatório técnico EOTA TR 001 [17].

Tabela 4 - Valores a utilizar no teste de impacto do corpo mole em paredes interiores quanto à segurança no uso [17].

Teste	Objeto de impacto (kg)	N.º de impactos	Energia (Nm)	Critério
Impacto corpo mole	50,0	1	100 – 200 – 300 – 400 ou 500	Não pode ocorrer o colapso, penetração nem projeção

Tabela 5 - Valores a utilizar para os vários testes de impacto, para o corpo mole, em paredes interiores em manutenção [17].

Impacto corpo mole	Objeto de impacto (kg)	N.º de impactos	Energia (Nm)	Critério
Teste 1	50,0	3	60,0 ou 120,0	Não pode ocorrer penetração nem projeção.
Teste 2	50,0	1	700,0 ou 900,0	Não pode ocorrer o colapso, penetração nem projeção.
Teste 3	50,0	3	100,0 – 130,0 – 300,0 ou 400,0	Não pode ocorrer penetração nem projeção.

2.2.2 Ensaio para determinar a resistência ao impacto do corpo duro

O teste de impacto de corpo duro simula o impacto, resultante de um objeto cair acidentalmente contra o painel [18].

O corpo rígido é solto de uma altura, criando uma energia de impacto, que corresponde à energia de impacto libertada quando móveis ou objetos similares chocam com o painel. O teste é realizado com referência à segurança em uso, isto é, se verifica ainda o desempenho pretendido após a colisão de um objeto (por exemplo com referência a estanqueidade ao vapor de água) [17].

- Equipamento [17]

Para a segurança de utilização, o pêndulo do corpo duro deve ser uma esfera de aço, com um diâmetro de 63,5 mm (± 1), com uma massa de 1030 g (± 40) (1,0 kg de esfera de aço). Para manutenção, deve ser uma esfera de aço, com um diâmetro de 50 mm ($\pm 0,5$), com uma massa de 514,0 g (± 19) (esfera de aço de 0,50 kg).

- Preparação do teste [17]

O painel deve ser posicionado horizontalmente nos suportes (Figura 4), para permitir, no caso de um resultado de ensaio desfavorável, a possibilidade de o objeto de impacto atravessar completamente o painel.

O ponto de impacto mais gravoso deve ser tido em conta. Na maioria dos casos, este será o centro do painel, mas, para painéis com reforço por detrás de uma face relativamente fraca, a posição de impacto mais desfavorável é a uma distância de 25 mm (± 2) do reforço.

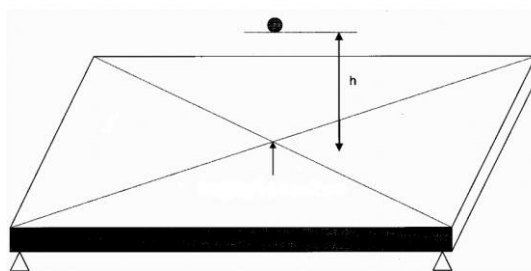


Figura 4 – Teste de impacto de um corpo duro num painel. Adaptado [17].

- Procedimento [17]

Neste ensaio, o pêndulo do corpo duro com massa (m) é largado de uma altura (h), pelo que a energia total do impacto ($E = g \times h \times m$) corresponde a um dos seguintes ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$):

- teste de impacto de corpo duro (1 kg de esfera de aço): 3,0 Nm ou 10,0 Nm;
- teste de impacto do corpo duro (esfera de aço de 0,5 kg): 1,3 Nm; 2,5 Nm; 3,75 Nm ou 6 Nm. A altura (h) é medida entre o ponto designado de impacto e a altura de libertação do corpo duro.

- Expressão dos resultados dos testes [17]

O resultado do teste é aprovado/reprovado, dependendo de os conjuntos de painéis atenderem aos seguintes critérios combinados.

Para a Segurança em uso:

- sem colapso: o resultado do teste é favorável quando, após o teste, o painel ou conjunto mantém sua integridade mecânica e ainda é capaz de carregar seu próprio peso na posição testada;
- sem penetração: o resultado do teste é favorável quando, após o teste, o objeto de impacto não passou no espécimen deteste;

- nenhuma projeção: o resultado do teste é favorável quando, após o teste, o objeto de impacto não criou partes do painel (por exemplo, núcleo, face, reforço) para projetar a partir da face do painel, do lado contrário ao impacto da amostra, criando arestas de corte afiadas ou superfícies passíveis de causar contato.

Para a Manutenção:

- sem penetração: o resultado do teste é favorável quando, após o ensaio, o objeto de impacto não penetrou no face do corpo de prova no lado de impacto do corpo de prova;

- sem degradação: o resultado do teste é favorável quando, após o teste, não houver rachaduras, depressões, protuberâncias visíveis ou visíveis (a olho nu) ou quaisquer outros defeitos nos materiais, o que pode influenciar a adequação ao uso do painel ou montagem. As deformações que afetam apenas a aparência, são permitidas, mas devem ser mencionadas no relatório do teste. Num resultado de teste favorável, o relatório deve indicar qualquer dano (por exemplo, arranhões ou marcas de desgaste na forma de ranhuras).

Na Tabela 6, para vedações internas sem função estrutural, são apresentados valores de energia de impacto provocados pelo objeto de impacto e os seus respectivos limites quanto ao desempenho que é permitido observar para obterem aprovação. Estes limites são propostos pela ABNT NBR 15575-4 [16].

Tabela 6 – Impactos de corpo duro para vedações verticais internas [16].

Sistema	Energia de impacto de corpo duro (Nm)	Critério de desempenho
Vedação vertical sem função estrutural	2,50	Não ocorrência de falhas (estado limite de serviço).
	10,0	Não ocorrência de ruína, caracterizada por rutura (estado limite último).

Na Tabela 7 e na Tabela 8, são apresentados os valores a utilizar no ensaio do corpo duro quanto à sua solicitação propostos pelo relatório técnico EOTA TR 001 [17].

Tabela 7 – Valores a utilizar nos dois testes de impacto em paredes interiores quanto à segurança no uso [17].

Teste	Objeto de impacto (kg)	N.º de impactos	Energia (Nm)	Critério
Impacto corpo duro	1,0	1	10,0	Não pode ocorrer o colapso, penetração nem projeção

2.2.3 Cargas e limites de deslocamento impostos a paredes divisórias

As paredes modulares ou pré-fabricadas devem ter adequada resistências a cargas/forças impostas durante a transporte, instalação e serviço [19].

Sendo os edifícios essenciais à vida e à atividade humana, torna-se inevitável que estes e os seus órgãos apresentem características de desempenho que se enquadrem com a satisfação das necessidades do Homem [14].

A AS1684.1 recomenda que, em flexão, o máximo da deformação lateral das paredes deve estar limitada a $L/150$, mas não pode deformar mais que 20 mm.

De acordo com a ASTM E564-06, a rigidez de *cisalhamento* efetiva do painel G_{eff} , pode ser calculado através da equação (1):

$$G_{eff} = \frac{P}{\Delta} \times \frac{a}{b} \quad (1)$$

Onde $\frac{P}{\Delta}$ representa a inclinação do deslocamento de carga e a e b são o comprimento e a largura do painel, respetivamente.

De acordo com EN 1991-1 [20], em paredes divisórias com funções de guarda, deverá considerar-se a atuação de uma carga linear uniformemente distribuída, atuando horizontalmente a uma altura não superior a 1,20 m a partir do solo, cujos valores característicos da carga distribuída, q_k , tomam os seguintes valores:

- $q_k = 0,50$ kN/m, na utilização em atividades domésticas e residenciais;
- $q_k = 0,70$ kN/m, na utilização em escritórios;
- $q_k = 1,0$ kN/m, na utilização em atividades comerciais.

Tabela 8 – Valores a utilizar para os vários testes de impacto, para o corpo duro, em paredes interiores em manutenção [17].

Impacto corpo duro	Objeto de impacto (kg)	N.º de impactos	Energia (Nm)	Critério
Teste 1	1,0	3	2,50* ou 6,0**	Não pode ocorrer penetração nem projeção
Teste 2	1,0	1	10,0	Não pode ocorrer o colapso, penetração nem projeção
Teste 3	0,50	3	1,0 – 3,0 ou 6,0	Não pode ocorrer penetração nem projeção
Nota:	<p>Tipo I - Zonas acessíveis principalmente àquelas com alto incentivo para o cuidado do exercício. Pequeno risco de acidentes ocorridos e de uso indevido (100,0 Nm).</p> <p>Tipo II - Zonas acessíveis principalmente àqueles com algum incentivo para o cuidado. Algum risco de acidentes ocorridos e de uso indevido (200,0 Nm).</p> <p>Tipo III - Zonas prontamente acessíveis ao público e outras com pouco incentivo para o cuidado. Risco de acidentes ocorridos e de uso indevido (300,0 Nm).</p> <p>Tipo IV - Zonas e risco como II e III. Em caso de falha, o risco inclui a queda para um andar em um nível inferior (400,0 ou 500,0 Nm, dependendo dos requisitos regulamentares).</p> <p>* Zonas I e II como indicado na nota em cima</p> <p>** Zonas III e IV como indicado na nota em cima.</p>			

De acordo com ETAG 003 (Guideline for European Technical Approval) Internal Partition Kits for use as Non-Loadbearing Walls [21], o limite da deformação é de 25 mm.

De acordo com um relatório realizado pelo instituto ITeCons, associado à Universidade Coimbra [22], foi feita a caracterização mecânica de uma divisória de compartimentação leve, a deformação de um painel é limitada a $L/500$. Este relatório foi realizado com ajuda da ETAG 003.

De acordo com a norma Brasileira ABNT NBR 15575-4 [16], os Sistemas Verticais Internos e Externos (SVVIE), destinados a edificações habitacionais de até cinco pavimentos, solicitados a cargas permanentes e deformações impostas, não devem apresentar a ocorrência de falhas, tanto nas paredes como nas interfaces da parede com outros componentes. É ainda estabelecido um ensaio com um dispositivo de fixação padrão do tipo mão francesa, em que a carga aplicada em cada painel é de 0,40 kN, para cada ponto de aplicação, e os critérios de desempenho são:

- a não ocorrência de falhas que comprometam o estado limite de serviço;
- limitação dos deslocamentos horizontais inferiores ou iguais a $L/500$.

Nesta mesma norma, é ainda descrito o ensaio da mão-francesa padrão. Este ensaio pretende simular peças suspensas nos painéis, como armários e lavatórios. Na Figura 5, é possível observar o esquema deste ensaio estabelecido pela mesma norma.

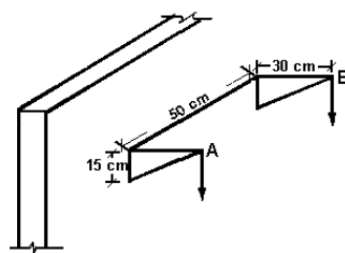


Figura 5 – Esquema de mão-francesa para ensaios de peças suspensas, como lavatórios e prateleiras. Adaptado [16].

Por forma a simular as cargas suspensas no painel, como prateleiras e lavatórios, é aplicada uma cantoneira, “L”, com lados de comprimento igual a 300 mm e largura de 150 mm. No caso de dispositivos específicos, como armários especiais ou aparelhos eletrónicos, deve-se adotar os dispositivos preconizados pelo fabricante/fornecedor. Este deve fornecer os dados de ensaio, considerando as cargas limites aplicadas e as cargas de uso com coeficiente de

segurança pelo menos igual a três. Devem ser verificados também os limites dos valores de deslocamento horizontal, instantâneo e residual, para as cargas de uso.

2.3 Certificação de Qualidade

Neste subcapítulo são descritas as formas de certificação que um produto de construção deve apresentar para ser comercializado.

2.3.1 Marcação CE

A Marcação CE indica que um produto está conforme com a legislação europeia e com as normas europeias harmonizadas, podendo circular livremente no mercado interno. Através da afixação da marcação CE num produto, o fabricante declara, sob a sua exclusiva responsabilidade, a conformidade desse produto com todos os requisitos legais necessários à obtenção da marcação. Estão abrangidos pela marcação CE as categorias de produtos ao abrigo de diretivas específicas que prevejam a obrigatoriedade da marcação CE [23].

2.3.2 Documento de Homologação

Segundo um relatório do LNEC [24], a publicação do Decreto-Lei n.º 50/2008, de 19 de março, veio alterar o art.º 17.º do Regulamento Geral das Edificações Urbanas (RGEU). Assim, de acordo com este Decreto-Lei, são abrangidos pela homologação do LNEC os produtos e sistemas de construção utilizados em edificações urbanas – quando relevantes para a satisfação das exigências essenciais referidas no n.º 1 do art.º 17.º do RGEU, com a atual redação dada pelo referido Decreto-Lei, desde que:

- não sejam cobertos por Normas Portuguesas ou por Normas Europeias adotadas em Portugal;
- não sejam objeto de uma Aprovação Técnica Europeia;
- não sejam objeto de certificação obrigatória;

sendo a homologação dispensada quando se verificarem os pressupostos referidos no n.º 5 do art.º 17.º do RGEU, com a atual redação do referido Decreto-Lei.

Um Documento de Homologação (DH) de um produto ou sistema de construção inclui, para além da Decisão de Homologação, uma descrição geral do produto ou sistema em

questão, a enumeração das suas características, o campo de aplicação, regras para aplicação em obra, uma apreciação global com indicação do previsível tempo de vida útil (determinado com base nos resultados dos ensaios realizados e nas observações decorrentes de visitas às instalações de fabrico, a obras em curso e a construções em uso) e as características e respetivas tolerâncias a avaliar no âmbito da realização de eventuais ensaios de receção.

Paralelamente à emissão de homologações simples, o LNEC concede igualmente homologações com certificação a produtos cuja produção, além de ser objeto de controlo interno permanente da responsabilidade do fabricante, é submetida a um controlo externo por parte do LNEC (ou de uma entidade por este reconhecida como competente para o efeito); nesse controlo externo, incluem-se visitas periódicas às instalações de fabrico para verificação das condições de produção e dos procedimentos adotados naquele controlo interno, e recolha de amostras destinadas a ensaio no LNEC.

No caso de produtos ou sistemas de construção estrangeiros que tenham sido homologados no país de origem e desde que o respetivo Instituto Homologador seja membro da União Europeia para a Aprovação Técnica na Construção (UEATC), o LNEC pode realizar um estudo de confirmação de homologação, o qual, se for favorável, dará origem à emissão de um DH.

O prazo de validade de um Documento de Homologação simples é normalmente de três anos, findo o qual pode haver lugar à sua revisão e renovação caso o fabricante manifeste interesse e sejam satisfatórios os resultados da reapreciação efetuada pelo LNEC; essa reapreciação inclui a realização de novos ensaios e a verificação das condições de fabrico e de aplicação, bem como a reavaliação da respetiva aptidão ao uso.

Já os DH com Certificação são emitidos com um prazo de validade de cinco anos, podendo ser renovados, caso o fabricante manifeste interesse, na sequência da realização pelo LNEC de um conjunto simplificado de procedimentos. Por sua vez, o prazo de validade dos DH que correspondam a confirmações de homologações estrangeiras é normalmente condicionado ao da homologação de origem, caducando quando termina o prazo de validade desta última.

No caso de produtos e sistemas de construção sujeitos a homologação, mas cuja comercialização em Portugal se encontre ainda numa fase incipiente ou cujo desenvolvimento industrial ainda não permita a concessão de uma homologação, considera-se que a emissão pelo LNEC de um parecer favorável, normalmente traduzido numa

apreciação preliminar, constitui a forma adequada de cumprir o disposto no citado diploma legal. Porém, logo que os pressupostos anteriores deixem de se verificar, aqueles produtos ou sistemas devem ser objeto de uma homologação.

Parte II

DESENVOLVIMENTO

3 Análise de uma Parede Divisória em XPS

Neste capítulo é estudado o painel em XPS como uma possível solução construtiva com função de dividir espaços interiores de habitação. De maneira a incorporar tal função, não sendo só de isolamento térmico, o material tem de apresentar um comportamento de segurança que será estudado neste capítulo.

3.1 Poliestireno extrudido

Tendo em conta que o propósito deste trabalho é o desenvolvimento de uma parede interior em painel sandwich com núcleo em poliestireno extrudido, neste subcapítulo é feita uma apresentação sumária deste material de construção, onde concentra os aspetos gerais, algumas das suas propriedades e o seu uso em paredes divisórias.

3.1.1 Aspetos gerais

Ray McIntire nasceu em Gardner, Kansas e formou-se na Universidade do Kansas em engenharia em 1940, tendo de seguida ido trabalhar para a Dow Chemical Company. Inventou a espuma de poliestireno, mais conhecido pela sua marca, STYROFOAM™. Patentada em 1944 é, atualmente, uma marca líder de isolamento, usada em milhões de residências e edifícios em todo o mundo para aumentar a eficiência energética e proteger contra o vento, a chuva e a humidade. Em 1947, investigadores da Dow's Chemical Physics Lab descobriram uma maneira de fazer espuma de poliestireno. Liderado por Ray McIntire, redescobriram um método inicialmente usado pelo inventor Carl Georg Munters [25].

Dow adquiriu os direitos exclusivos das patentes de Munters e descobriram outras formas de produzir em larga escala o poliestireno extrudido como uma espuma de célula fechada resistente à humidade. Esta invenção refere-se a um método melhorado para o fabrico de produtos termoplásticos e, especialmente, à produção destes na forma de massas celulares uniformes de tamanho considerável. A patente de Munters revela um método de preparação de poliestireno celular que envolve o aquecimento do poliestireno sólido e um gás numa célula fechada (Figura 6) sob determinada pressão, a uma temperatura acima do ponto de fusão do polímero, de modo a provocar a absorção de uma porção do gás.

Posteriormente, abre-se uma válvula no fundo, para permitir o escoamento do polímero a partir do recipiente. Durante o escoamento, o polímero incha pela expansão do gás e é levado a assumir a forma de um corpo, composto na maior parte das células fechadas individuais. A patente menciona uma série de gases, tais como ar, dióxido de carbono e o nitrogénio.

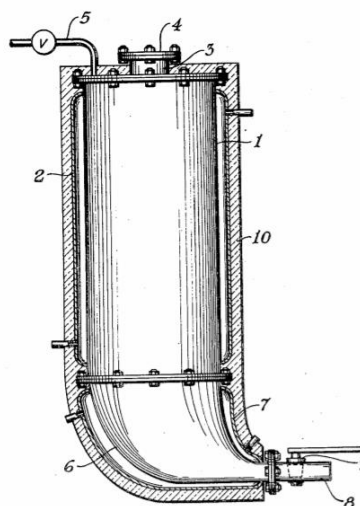


Figura 6 - Célula para o fabrico de poliestireno extrudido. Adaptado [26]

O XPS (designação universal de eXtruded PolyStyrene) ou Poliestireno Extrudido é um isolante térmico fabricado em painéis ou placas rígidas de espuma de natureza sintética, com estrutura celular fechada (processo de extrusão), que contém um gás expensor inflamável que lhe é adicionado no processo de fabrico. Fazem parte da sua matéria prima os cristais de poliestireno, assim como outros aditivos orgânicos, incluindo um retardador de chama, como espumas fenólicas, que só se decompõem a temperaturas entre 350° e 500° C e inflamam entre 530° e 580° C. Enquanto, que o seu comportamento ao fogo é dominado pela sua tendência desfavorável de derreter a temperaturas apenas um pouco acima de 100°C e a inflamar a 360°C libertando muito fumo, constituído por dióxido de carbono e o estireno, e depois forma partículas inflamáveis [27].

A característica que mais o distingue face a outros isolantes térmicos é a quase nula absorção de água. Atualmente, o XPS é o isolante térmico mais utilizado na construção civil [28]. Possui excelentes propriedades físicas, pelo facto de ser muito dúctil e relativamente forte em comparação com outras espumas de plástico rígido. O poliestireno é um material termoplástico, o que significa que pode ganhar nova forma por aquecimento. No entanto, é bastante menos significativo em termos de aplicação para painéis de sanduíche porque não tem propriedades de ligação com as faces. Consequentemente, o poliestireno só

está disponível em placas que devem ser coladas ao material de revestimento usando adesivos. Não há praticamente nenhum encolhimento de XPS após a sua fabricação [27]. Em seguida, salientam-se duas vantagens no uso do XPS [29]:

- Possui uma estrutura celular fechada, isso torna-o num produto insensível à água e com boas propriedades como barreira de vapor;
- Apresenta muito boas propriedades isolantes. A sua baixa condutividade térmica e, em consequência, a sua elevada resistência térmica, proporcionam um isolante térmico ótimo, permitindo uma grande poupança de energia.

3.1.2 O uso do XPS em paredes divisórias

A utilização de isolamentos térmicos em paredes generalizou-se em Portugal a partir de meados da década de 80 do século XX, na sequência da publicação da regulamentação relativa ao conforto térmico em edifícios [2].

As soluções propostas de isolamento térmico pelo interior têm como base a utilização de um isolante térmico localizado entre a superfície interior do elemento de alvenaria (ou parede de betão) que constitui a parede exterior e uma solução de revestimento, em geral constituída por painéis de gesso cartonado, eventualmente por placas de madeira ou derivados, e em alguns casos por um revestimento de ligantes hidráulicos ou mistos, aplicados em obra.

Os isolantes térmicos mais comuns nestas soluções são as placas de poliestireno expandido moldado (EPS) ou extrudido (XPS), de lã mineral (MW) e, ainda, a espuma rígida de poliuretano (PUR) projetado. As soluções mais comuns recorrem à aplicação em obra do isolante na superfície interior do pano de alvenaria (exterior) e posterior aplicação de placas de gesso cartonado como solução de revestimento. Embora as placas de gesso cartonado possam ser coladas sobre um isolante com rigidez adequada, uma solução comum consiste na realização de uma estrutura independente de perfis metálicos na qual são aparafusadas as placas de gesso cartonado. No caso do PUR projetado sobre a superfície (não rebocada) da alvenaria, as placas e gesso (ou outras) são fixadas a uma estrutura independente. Como alternativa, existe a possibilidade de recorrer a painéis compósitos pré-fabricados de placa de gesso cartonado/isolante térmico (MW, EPS, PUR, etc.) que são diretamente colados sobre a superfície da alvenaria ou fixados mecanicamente a uma estrutura independente.

A aplicação de um revestimento de ligantes hidráulicos ou mistos, em geral armado com rede metálica (rede de galinheiro), redes de fibra de vidro ou sintéticas, é efetuado sobre placas de EPS ou de XPS previamente fixadas (em geral, por colagem, com eventual fixação mecânica complementar). Esta solução não é aconselhada devido a vários fatores: problemas provocados pelas deficiências de aderência do revestimento ao isolante, ou deste ao suporte de alvenaria; necessidade de assegurar uma resistência mecânica adequada; fendilhação devida a variações dimensionais ou a ações mecânicas diversas; falta de qualidade da conceção e da execução, a qual é, em geral, assegurada por técnicos e operários desconhecedores das exigências específicas da solução.

Se a solução de isolamento térmico pelo interior for considerada interessante em termos de intervenções de reabilitação, observa-se nos anos mais recentes um aumento do seu uso em construção nova. Ultrapassada uma certa reação desfavorável em relação aos aspetos da falta de “solidez” (sonoridade ao toque, deformabilidade e degradação sob a ação de choques e dificuldades na fixação de objetos mais pesadas) as vantagens concorrenciais em termos de custo e de rapidez de execução, será de prever que à semelhança do que ocorre em muitos outros países, nomeadamente, europeus, esta solução se vulgarize e se torne mesmo predominante, quer em reabilitação, quer em construção nova. Com esta solução não existe qualquer dificuldade em termos de obtenção dos níveis de isolamento térmico desejados em superfície corrente e, por outro lado, a correção das pontes térmicas planas – pilares ou talões de vigas – pode ser facilmente realizada [11].

3.1.3 Normas Requeridas ao XPS

Neste subcapítulo são abordadas as normas aplicáveis ao XPS, no âmbito do controlo de qualidade, desde atribuição da marcação CE e o controlo das características físicas, de resistência mecânica e dimensões do produto.

Este componente tem de ter marcação CE, preferencialmente com todas as características a seguir referidas incluídas. Os ensaios são definidos com base no ETAG 004 [30]. Distinguem-se dois tipos de normas de ensaio, as de caracterização e de identificação, aplicadas ao XPS, que se encontram sistematizadas a seguir.

As normas dos Ensaios de caracterização são:

- Determinação da classe de reação ao fogo (EN 13501-1);

- Absorção de água em período curto por imersão parcial (NP EN 1609);
- Permeabilidade ao vapor de água (NP EN 12086);
- Resistência à tração perpendicular às faces, em condições secas e húmidas (NP EN 1607);
- Resistência ao corte (NP EN 12090). – Módulo de elasticidade transversal (NP EN 12090);
- Resistência térmica (EN 12667; EN 12939).

As normas dos Ensaios de identificação são:

- Massa volúmica (NP EN 1602);
- Características dimensionais (NP EN 822 e NP EN 823);
- Resistência à compressão (EN 826);
- Estabilidade dimensional (NP EN 1603).

3.1.4 XPS como parede divisória

Atualmente, existem várias soluções construtivas que tiram proveito da melhor característica que o XPS apresenta, a sua capacidade de isolamento térmico. Estas soluções definem-se como elementos que são usados como barreira do exterior para o interior, ou ainda do interior para o interior, das habitações, podendo tratar-se de elementos verticais, horizontais ou inclinados. Alguns exemplos destas soluções já foram apresentados nos subcapítulos anteriores.

Numa fase muito inicial deste projeto, de desenvolvimento de uma parede em painel sandwich com núcleo em XPS, questionou-se se seria possível desenvolver uma parede, exclusivamente, em XPS. Com este desafio, foram colocadas outras duas questões. Como é que este material se comporta, em termos de deformações, quando é solicitado a forças externas? E que material, com uma espessura reduzida, seria o ideal para acabamento do XPS? Estas questões guiaram o processo de investigação subjacente a este estudo.

3.2 Definição das propriedades mecânicas e físicas do painel em XPS

Numa fase inicial, de seleção das propriedades mecânicas e físicas do XPS, realizou-se uma ativa pesquisa de painéis em XPS disponíveis no mercado atual, tendo em conta a necessidade de o painel ter a capacidade de resistir a ambientes húmidos.

É de conhecimento comum, de que o pé direito de uma habitação comum está entre os 2,30 m e 3,0 m. Optou-se, no entanto, que a altura de um painel deveria ser de 3,0 m, pelo simples facto de não se saber ao certo o destino de aplicação do mesmo. Quanto à largura, foi definida como 1,0 m por se tratar de uma medida exata e também por ser muito solicitada nos catálogos de produtos de isolamento térmico. Já em relação à espessura, esta escolha teve de ter em conta o facto da necessidade de se embutir um autoclismo autoportante, como se pode observar na Figura 7. Selecionou-se um autoclismo autoportante com uma espessura de 80 mm e, por este motivo, definiu-se assim a espessura de 100 mm.

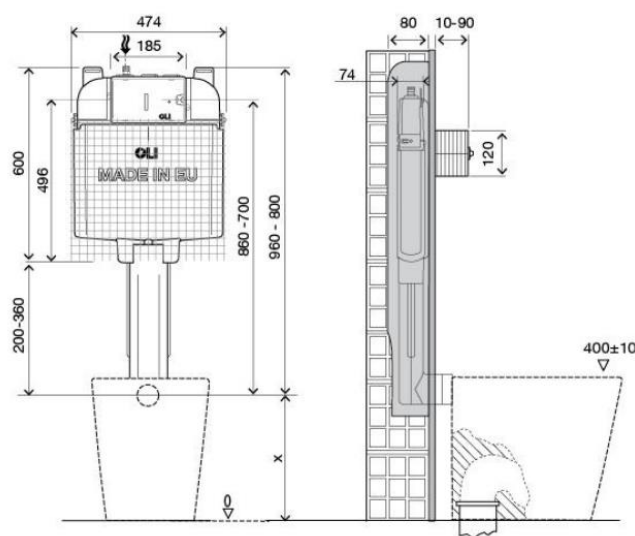


Figura 7 – Exemplo de um autoclismo autoportante. Adaptado [31].

Após a seleção das propriedades físicas, prosseguiu-se à fase de escolha das propriedades mecânicas, visto estas estarem diretamente relacionadas com a geometria do painel. As características mecânicas e físicas adotadas para o painel XPS, que servirá como exemplo para o caso de estudo, encontram-se na Tabela 9. Estas propriedades foram obtidas através de um catálogo de uma empresa especializada em XPS [32].

Tabela 9 – Propriedades mecânicas e físicas do painel em XPS. Adaptado [32].

XPS	E (MPa)	σ (kPa)	Densidade (kg/m ³)	Altura (m)	Largura (m)	Espessura (m)
	30,0	500,0	30,0	3,0	1,0	0,10

As propriedades mecânicas podem variar consoante o uso pretendido, desde painéis mais resistentes ao fogo ou com propriedades acústicas melhoradas. Há painéis XPS com módulos de elasticidade a variar entre 15 e 40 MPa e com tensões admissíveis entre 300 e 700 kPa. Neste caso de estudo optou-se por painéis hidrófugos.

Anteriormente, foi questionado qual seria o acabamento final para o XPS quando se pretende que este tenha função de divisória interior. Em resposta a esta questão, foi decidido aplicar como revestimento uma camada vinílica estampada com tintas à base de água com uma película protetora transparente. Esta solução é indicada para espaços onde a higiene é imprescindível. As vantagens desta solução são [33]:

- atende aos requisitos internacionais mais rigorosos no campo da segurança contra incêndios;
- é fácil de aplicar e não requer nenhum tempo de secagem;
- é fabricado de modo favorável ao ambiente, completamente reciclável;
- é fácil de desinfetar.

Como se trata de um material que apresenta uma função de revestimento, este não foi considerado nos cálculos apresentados no seguinte subcapítulo, visto que não altera, de forma significativa, na deformação do painel em XPS.

3.3 Simulação analítica do comportamento mecânico de um painel em XPS

Neste subcapítulo serão apresentadas fórmulas de cálculo simples por forma a ser feita a verificação da segurança do painel em XPS, ou seja, em estado de serviço. De maneira a simplificar a análise estrutural do painel em XPS, admitiu-se que a parede poderia ser representada com uma viga simplesmente apoiada, assumindo-se, portanto, um apoio duplo

(impedindo a translação no sentido vertical e horizontal) e um apoio simples (impedindo a translação no sentido vertical), em cada extremidade.

Definida assim a estrutura, foram estabelecidas quatro tipos de solicitações de carga a aplicar no painel, tendo em conta no que foi apresentado no subcapítulo 2.2.3:

- carga distribuída ao longo do vão;
- carga pontual a meio vão;
- carga distribuída até 1,20 m a partir de uma extremidade;
- momento aplicado a uma distância x no vão.

Sabe-se que as propriedades mecânicas e físicas estão diretamente relacionadas com a capacidade resistente de um material e, por isso, através da equação (2) é possível obter a tensão admissível (σ), em MPa, do mesmo [34].

$$\sigma = \frac{M}{EI} \times \frac{h}{2} \quad (2)$$

Onde, neste caso:

- M – momento aplicado [kNm];
- h – espessura do material (Figura 8) [m];
- E – módulo de elasticidade [GPa];
- I – momento de inércia [m⁴].

A relação entre tensões e deformações para cargas não muito elevadas é em geral linear para a maioria dos materiais utilizados em estruturas sendo, as deformações durante parte do carregamento também consideradas lineares [35].

Por forma a determinar o momento resistente M_{rd} , em kNm, colocou-se este em evidência, através da equação (2), obtendo assim a equação (3).

$$M_{rd} = \frac{2 \sigma E I}{h} \quad (3)$$

Sendo o momento inércia descrito pela equação (4).

$$I = \frac{b h^3}{12} \quad (4)$$

Em que b – largura do painel (Figura 8) [m].

Na Figura 8, apresenta-se o painel em XPS, em visualização tridimensional, com as incógnitas adotadas para as dimensões do mesmo.

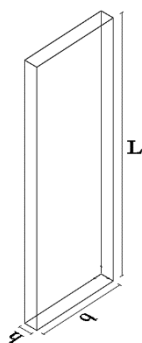


Figura 8 – Modelo simplificado de um painel em XPS com as incógnitas adotadas para as suas dimensões.

Sabendo o momento fletor resistente, equação (3), é possível comparar com o momento fletor atuante, como mostra a equação (5).

$$M_{rd} \geq M_{ed} \quad (5)$$

O momento atuante é obtido através da multiplicação da força exercida pela distância ao seu ponto de aplicação.

Para o cálculo das deformações resultantes, adotaram-se as equações que serão apresentadas em seguida para cada caso de carga aplicada na parede. Estas equações foram retiradas de um livro técnico, de perfis e fórmulas, norueguês [36], exceto para o caso do momento aplicado. Onde:

- w – deformação [m];
- q – carga linear uniformemente distribuída aplicada [kN/m];
- P – carga pontual [kN];
- L – comprimento do vão [m];
- E – módulo de elasticidade [GPa];
- I – momento de inércia [m⁴];
- R_A – reação no apoio à esquerda [kN];
- R_B – reação no apoio à direita [kN].

Apresentam-se, de seguida, as equações para cada tipo de aplicação de carga e a respetiva deformação. Para uma carga uniformemente distribuída aplicada em todo vão simplesmente apoiado (Figura 9), a deformação (Figura 10) é expressa pela equação (6):

$$w = \frac{5}{384} \frac{qL^4}{EI} \quad (6)$$

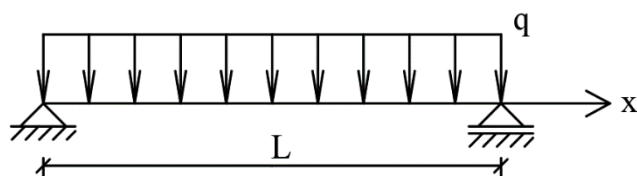


Figura 9 – Carga uniformemente distribuída ao longo do vão simplesmente apoiado.

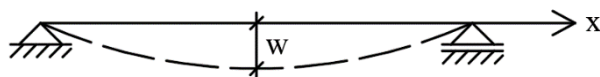


Figura 10 – Representação da deformação da aplicação de uma carga uniformemente distribuída pelo vão simplesmente apoiado.

Para uma carga uniformemente distribuída aplicada num vão simplesmente apoiado até uma determinada distância “a” segundo a direção x (Figura 11), a deformação é expressa na equação (7):

$$w = \frac{1}{48} \frac{qa^2L^2}{EI} \left(1,5 - \frac{a^2}{L^2}\right) \quad (7)$$

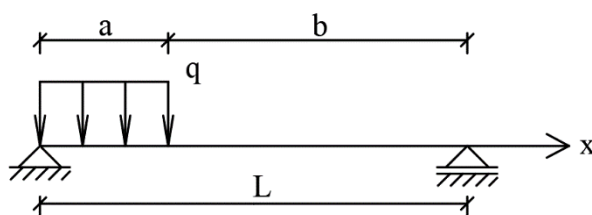


Figura 11 – Carga uniformemente distribuída aplicada num vão simplesmente apoiado até uma determinada distância “a” segundo a direção x.

Para uma carga pontual aplicada a meio do vão simplesmente apoiado (Figura 12), a deformação é expressa pela equação (8):

$$w = \frac{1}{48} \frac{PL^3}{EI} \quad (8)$$

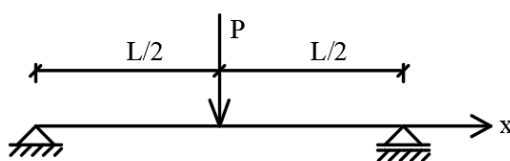


Figura 12 – Carga pontual aplicada no meio do vão simplesmente apoiado.

É necessário salientar que a carga pontual foi aplicada a meio vão da estrutura, porque é onde se verifica uma maior deformação, quando comparada com uma carga pontual aplicada a outra distância no mesmo vão.

Para um momento aplicado num vão simplesmente apoiado (Figura 13), a deformação é expressa na equação (9). Quando o momento é aplicado a meio vão ($b = \frac{1}{2}$ e $x = \frac{1}{2\sqrt{3}}$) a deformação resultante é expressa na equação (10). A deformação resultante máxima que se pode obter através da aplicação de um momento é numa das extremidades do vão e verifica-se para $x = \frac{1}{\sqrt{3}}$ [34].

$$w = \frac{M \times (L^2 - 3b^2 - x^2)}{6LEI} \quad (9)$$

$$w = \frac{ML^2}{72\sqrt{3}EI} \quad (10)$$

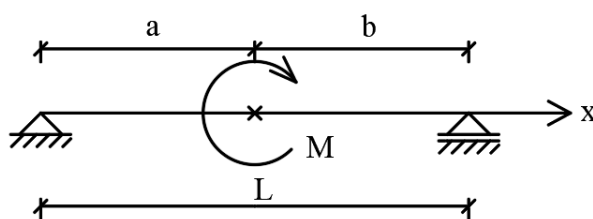


Figura 13 – Momento aplicado num vão simplesmente apoiado.

Em seguida, serão apresentadas tabelas de cálculo, com a respetiva deformação para os diferentes tipos de carga aplicada no painel. À intensidade das forças não foi aplicado qualquer tipo de coeficiente de majoração ou segurança, por se tratar de um estudo no estado de serviço. Na Tabela 10, encontram-se os valores obtidos, através das equações (3) e (8), para as deformações resultantes de uma carga pontual, aplicada a meio vão.

Tabela 10 – Resultados obtidos para uma carga pontual aplicada a meio vão para num painel em XPS.

M_{rd} (kN×m)	P (kN)	R_A (kN)	R_B (kN)	M_{ed} (kN×m)	w (m)
0,83	0,50	0,72	0,72	0,33	0,11

Na Tabela 11, descrevem-se os resultados obtidos, através das equações (3) e (6), para a deformação resultante da aplicação de uma carga linear distribuída uniformemente em todo o vão do painel.

Tabela 11 – Resultados obtidos para uma carga distribuída uniformemente em todo o vão de um painel em XPS.

M_{rd} (kN×m)	q (kN/m)	R_A (kN)	R_B (kN)	M_{ed} (kN×m)	w (m)
0,83	0,24	0,36	0,36	0,27	0,10
	0,50	0,75	0,75	0,56	0,21

Nota: $R_A = R_B = \frac{qL}{2}$

O valor da carga distribuída uniformemente, $q = 0,24$ kN/m, foi atribuída com base na consulta de um manual de construção americano [37].

Na Tabela 12, descrevem-se os resultados obtidos, através das equações (3) e (7), para a deformação resultante da aplicação de uma carga linear distribuída uniformemente a 1,20 m do solo no painel ($a=1,20$).

Tabela 12 - Resultados obtidos para uma carga distribuída uniformemente a 1.20 m do solo num painel em XPS.

M_{rd} (kN×m)	q (kN/m)	R_A (kN)	R_B (kN)	w (m)
0,83	0,50	0,48	0,12	0,07

Nota: $R_A = \frac{qa}{L} \left(L - \frac{a}{2} \right)$ e $R_B = \frac{qa^2}{2L}$

O valor da carga aplicada no painel apresentada na Tabela 12, foi consultado no Euro código 1 [20], como foi apresentado no subcapítulo 2.2.3.

Na Tabela 13, descrevem-se os resultados obtidos, através da equação (3) e (9), para a deformação resultante da aplicação de um momento aplicado a meio do vão do painel.

Tabela 13 – Resultados obtidos para um momento aplicado a meio vão de um painel em XPS.

M_{rd} (kN×m)	P (kN)	M_{ed} (kN×m)	R_A (kN)	R_B (kN)	w (m)
0,83	0,80	0,28	0,09	0,09	0,008

Nota: As reações R_A e R_B foram obtidas através da transformação do momento num binário de forças:

$$R_A = R_B = \frac{0,28}{3,0} = 0,093 \text{ kN}$$

O momento de solicitação, M_{ed} , foi obtido tendo em conta a distância do ponto de aplicação da carga, 30 cm, definidos no teste da mão-francesa (Figura 5). A esta distância, foi ainda adicionado metade da espessura do painel ($h=0,05$ m), por forma a tornar a distância total ao centro de massa do painel, ou seja, $M_{ed} = 0,80 \times (0,30+0,05)=0,28 \text{ kN} \times \text{m}$.

Comparando o valor da deformação obtido para cada caso de aplicação de carga e estabelecendo o limite de deformação em $L/500$, ou seja, para um vão de 3 m ($L=3,0$) obtém-se um limite de deformação de 6 mm, concluiu-se que o painel não verifica esta condicionante, para nenhum caso de carga aplicada, definindo-o assim como um painel sem capacidade de resistir às solicitações aplicadas.

3.4 Modulação numérica do painel em XPS

Para o desenvolvimento dos modelos numéricos dos painéis sandwich, foi utilizado o programa de cálculo automático SAP2000 (versão 20), tendo sido desenvolvidos modelos de elementos finitos bidimensionais. O SAP2000 é um programa de elementos finitos, com interface gráfica 3D orientado a objetos, preparado para realizar, de forma totalmente integrada, a modelação, análise e dimensionamento de estruturas [38].

Por forma a obter um modelo, do painel em XPS, mais próximo da realidade, modelou-se o mesmo neste programa, em que é utilizado o método de elementos finitos (método desenvolvido a fim de obter soluções aproximadas de problemas representados através de sistemas de equações diferenciais). Atribuiu-se um apoio duplo na base do painel, junto ao solo, e um apoio simples no topo do painel, de maneira a ser possível comparar com o estudo já efetuado, obtendo assim um sistema isostático. Na Figura 14, encontra-se o modelo do painel em XPS onde é possível observar o tipo de apoios e a orientação dos eixos.

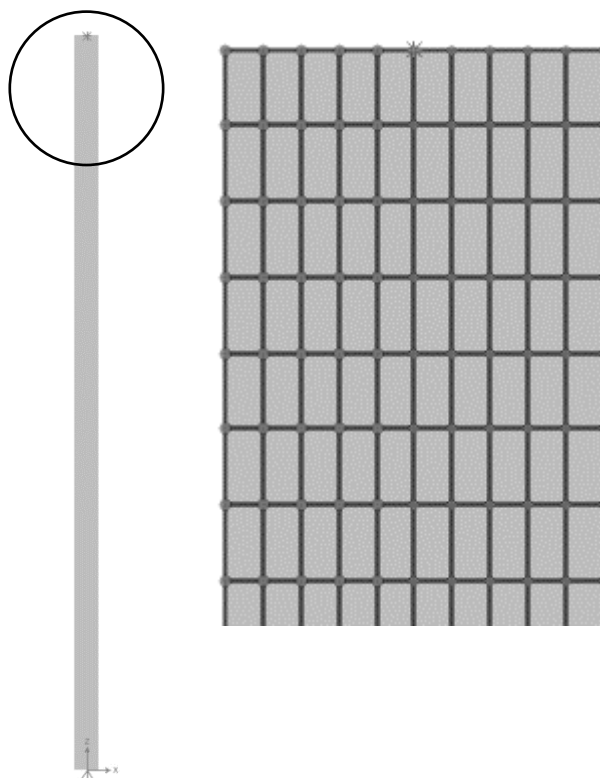


Figura 14 –Painel em XPS modelado em SAP2000.

Trata-se de um modelo em duas dimensões (2D), e as suas propriedades de secção foram moduladas em áreas de secção $0,01 \times 0,02$ (largura \times comprimento), em metro. As características mecânicas e físicas do modelo são as mesmas que se encontram na Tabela 9. A atribuição do valor das cargas, na qual o modelo está sujeito, é a mesma que a análise anterior. Contudo, a sua solicitação em alguns tipos de carga teve de ser adaptada ao modelo como será demonstrado a seguir.

No caso do momento aplicado a meio vão do painel, nesta análise foi aplicado o ensaio da mão-francesa padrão (Figura 5). A intensidade da força aplicada é a mesma nos dois casos, mas o modo em como o painel é solicitado é diferente. Isto é possível observar na Figura 15, onde é representado a distribuição das forças equivalente a um momento provocado por uma força descente de intensidade 0,80 kN, aplicada numa cantoneira em “L”.

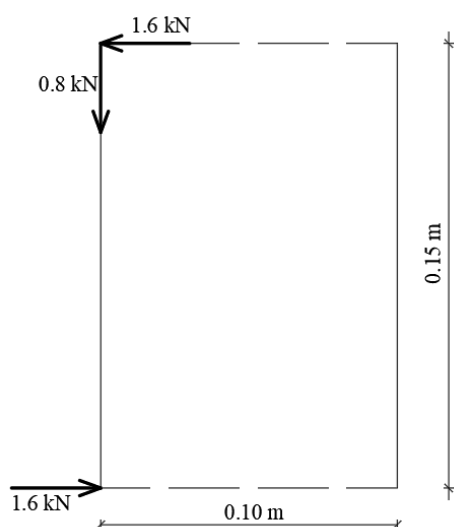


Figura 15 – Esquema representativo da aplicação de forças no painel em XPS com base no ensaio da mão-francesa, em corte transversal.

No caso da aplicação da carga pontual, foi feita uma distribuição da mesma no modelo em três pontos, com a intenção de evitar deformações residuais, perfazendo assim num total de três forças com intensidades de 0,17 kN (aproximadamente). Isto é possível observar-se na Figura 16 e na Figura 17, onde se observa a distância entre as mesmas devido à divisão feita no modelo em 2D e a divisão das áreas de superfície e aplicação das forças nos nós, respetivamente.

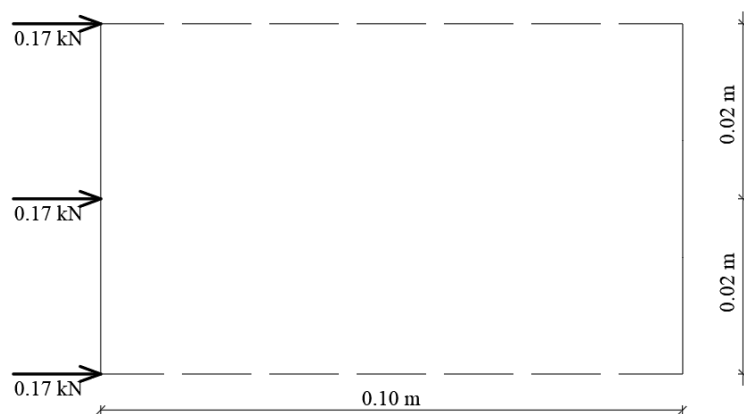


Figura 16 – Esquema representativo da divisão de uma carga pontual em três forças no painel em XPS, em corte transversal.

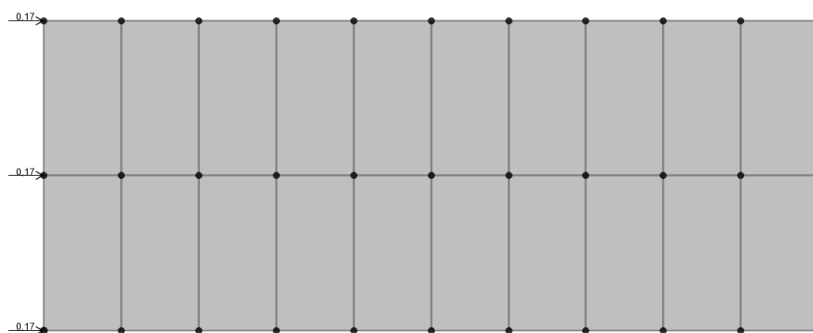


Figura 17 – Modelação do painel XPS em SAP2000 com três forças pontuais aplicadas.

Nos outros casos de aplicação de carga, a carga pontual e a carga distribuída uniformemente em todo o vão e a 1,20 m do solo, a intensidade é a mesma, mudando apenas o facto da carga ser aplicada na horizontal.

Na Tabela 14, é apresentado para cada tipo de carga aplicada no painel a respetiva deformação e reações nos apoios. Estes resultados foram obtidos a partir da realização de modelos, em SAP2000, para cada tipo de carga. As reações são obtidas através da opção de visualização de cargas resultantes. No caso da deformação, esta é observada através dos deslocamentos segundo a direção U_x .

Tabela 14 – Resultados obtidos da modulação do painel em XPS em SAP2000.

Tipo de aplicação da carga	w (m)	Reação no apoio inferior (kN)	Reação no apoio superior (kN)
Pontual	0,11	-0,25	-0,25
Distribuída	0,21	-0,76	-0,76
Distribuída a 1.20 m do solo	0,07	-0,49	-0,12
Mão-francesa padrão	0,01	-0,09(horizontal) e 0,8 (vertical)	+0,09

Nota: O sinal negativo nas reações significa que têm sentido contrário ao da força aplicada. O sinal positivo significa que a reação tem o mesmo sentido da força aplicada.

Perante esta análise, verifica-se também que o painel XPS não pode funcionar como um elemento vertical interior com a finalidade de divisória em habitações.

3.5 Comparação entre cálculo analítico e modulação em SAP2000

Com a obtenção de todos os resultados analíticos e através do SAP2000, desde a deformação resultante e reações nos apoios, segue-se a comparação entre os mesmos, para cada caso de força aplicada no painel em XPS.

No caso da aplicação da carga pontual (Tabela 10 e Tabela 14), a deformação e as reações nos apoios têm o mesmo valor ou apresentam valores muito próximos. O mesmo acontece para o caso da aplicação de uma carga uniformemente distribuída em todo o vão do painel (Tabela 11 e Tabela 14), caso da aplicação da carga distribuída uniformemente a 1,20 m a partir do solo (Tabela 12 e Tabela 14) e também para o caso do momento aplicado a meio vão (Tabela 13 e Tabela 14).

Relativamente ao caso do momento aplicado no painel, apesar da sua aplicação ser diferente nos dois diferentes tipos de análise, as reações e a deformação são idênticos. No caso da análise analítica o momento é aplicado diretamente com o valor de 0,28 kNm. Na modulação em SAP2000 o binário de forças perfaz um momento de 0,24 kNm, porque não se teve em consideração a espessura do painel, tendo sido aplicado na face do painel. É necessário salientar que a análise numérica, feita através de SAP2000, tem em conta as deformações causadas pelo esforço transversal.

3.6 Considerações finais

O painel em XPS com as propriedades mecânicas e físicas estabelecidas na Tabela 9, não é suficiente para suportar diferentes tipos de solicitações de forças com os respetivos limites de deformação. Existe assim a necessidade de colocar em ambas as faces do XPS, outro material que garanta a verificação destes limites.

Ao colocar este novo material, em ambas as faces do XPS, é esperado que não se melhore apenas a sua capacidade resistente a deformações ou impactos, mas também, a sua capacidade de:

- isolamento sonoro;
- resistência ao fogo;
- durabilidade.

4 Análise de uma Parede Divisória em Pannel Sandwich com Núcleo em XPS

Neste capítulo é estudado um painel sandwich com núcleo em XPS como solução construtiva de uma parede divisória interior, não tendo assim uma função de suporte estrutural. Apesar disso, o painel sandwich tem de apresentar um bom comportamento mecânico face a solicitações externas em serviço.

Através de fichas técnicas, fornecidas por empresas especializadas, obtém-se a informação das propriedades mecânicas dos materiais, sendo possível fazer uma análise estrutural prevendo as tensões e as deformações. Todavia, por causa da influência da flexibilidade do material do núcleo, estes painéis não podem ser construídos baseados apenas na teoria das vigas e placas. Outra consideração a ter em conta, é que os materiais do núcleo são, normalmente, escolhidos por causa da sua propriedade térmica existindo um diferencial de temperatura entre as duas faces do painel. Isto torna os painéis sandwich sensíveis a efeitos de temperatura. Os principais fatores a ter em conta quando se considera o comportamento estrutural são [27]:

- a influência da flexibilidade de *cisalhamento* do núcleo no comportamento global;
- a influência do núcleo no impedimento da encurvadura local das faces;
- a influência da temperatura nas tensões e deformações;
- fluência do material do núcleo com o tempo.

4.1 Descrição dos painéis sandwich

Os materiais compósitos são caracterizados por dois ou mais constituintes que diferem em forma e em composição química [39]. Um painel sandwich é um tipo de material compósito constituído por uma estrutura de três camadas: duas lâminas finas, rígidas e resistentes de material denso, separadas por uma camada de um material de baixa densidade e que pode ser muito menos rígido e resistente do que as lâminas. As diferentes tipologias e formas estruturais dos painéis sandwich podem ser obtidas através da combinação das diferentes formas do material de núcleo. Apesar da grande diversidade de materiais e configurações já

existentes para os painéis sanduíche, estão constantemente a ser propostos e utilizados novos materiais e novas combinações de materiais existentes [40].

No presente caso de estudo, os painéis sandwich serão constituídos por lâminas planas e um núcleo homogéneo, de maneira a garantir que o painel, no seu todo, contribua para a resistência às suas solicitações. Além disso, posteriormente, serão apresentados materiais para concretizarem a ligação entre as laminas e o núcleo, por forma a estes se comportarem como uma peça única.

As dimensões atribuídas para o painel sandwich mantém-se idênticas, pelos mesmos motivos, ao do painel apenas em XPS:

- comprimento = 3,0 m;
- largura = 1,0 m;
- espessura do núcleo = 0,10 m.

Faltando apenas atribuir as espessuras das duas lâminas de proteção do núcleo. Definiu-se com 10 mm de espessura para as duas lâminas como uma medida razoável para iniciar o estudo, de encontro com a definição de estrutura leve. Perfazendo no total uma parede com espessura de 120 mm.

4.2 Materiais para as lâminas

De maneira a cumprir os requisitos, que não foram verificados pelo painel apenas em XPS com função de divisória interior, foram selecionados materiais para as lâminas, e proteção do núcleo, sendo apresentados também como painéis. Estes painéis são produzidos em fábrica em larga escala através de linhas de produção. Através das fichas técnicas dos mesmos, disponibilizadas pelas suas empresas especializadas e com marcação CE, procedeu-se à seleção dos painéis com alto interesse para o caso de estudo. Tendo sido selecionados:

- Pannel de fibra de madeira de média densidade (MDF);
- Pannel de óxido de magnésio (MGO);
- Pannel aglomerado de partículas longas e orientadas (OSB);
- Pannel de madeira-cimento (PMC);
- Pannel de gesso cartonado (PGC).

Para cada painel é estabelecido uma ficha de produto. Na Tabela 15 encontram-se as referências das fichas de produto que contêm as propriedades estabelecidas para cada lâmina do painel sandwich.

Tabela 15 – Referências bibliográficas para cada lâmina do painel sandwich.

Painel	MDF	MGO	OSB	PMC	PGC
Fonte	[41]	[42]	[43]	[44]	[45]

Em seguida, no presente subcapítulo, é feita a descrição detalhada de cada um dos painéis selecionados para as lâminas do painel sandwich com núcleo em XPS.

4.2.1 MDF – Pannel de fibra de madeira de média densidade

Os painéis de MDF (Medium density fibreboard), apresentados na Figura 18, são apropriados para muitas aplicações de construção, interior e exterior, e industrial. A produção em larga escala deste produto de madeira de engenharia começou nos anos 80 [46]. São fabricados a partir de fibras de madeira de pinho, aglutinadas com resinas sintéticas, através da ação do calor e pressão. O produto é um painel homogêneo, fácil de cortar e moldar, que tem acabamento e densidades uniformes, com superfícies lisas [47].

Fresamento é a operação de maquinação frequentemente usada na fabricação de peças de MDF [46]. A maquinação compreende o processo de desbaste mecânico que visa dar forma a uma peça [48].

O grau de rugosidade da superfície do painel de MDF desempenha um papel importante, uma vez que quaisquer irregularidades na superfície podem aparecer através de camadas finas, reduzindo a qualidade final do painel. A rugosidade da superfície é uma propriedade que depende das características brutas/naturais e como dos processos de fabricação [46]. O painel selecionado é apropriado para utilização em meios húmidos.



Figura 18 – Exemplo de placas MDF. Adaptado [49]

4.2.2 MGO – Pannel de óxido de magnésio

O potencial do óxido de magnésio como aglutinante em materiais de construção tem sido reconhecido desde a descoberta de cimentos à base de magnésia em 1867. As soluções de óxido de magnésio podem ser usadas como aglomerantes em placas e painéis, em materiais isolantes e em diferentes aplicações arquitetônicas. As placas não contêm amianto, porém, a maioria possui diferentes tipos de fibras e microfibras de reforço [50].

O pannel de magnésio (Figura 19) é um pannel inovador, de construção ambiental, conhecido como placa de magnésio. É uma combinação de óxido de magnésio (MgO) e cloreto de magnésio (MgCl₂). Não arde, não faz fumo e é resistente á água. À placa é adicionada malha de fibra de vidro para aumentar a sua estabilidade. Uma das faces é lisa e suave, a outra é rugosa para a aplicação de revestimento. Apresenta alta dureza à colisão e ao impacto, não faz reação aos raios ultravioleta (UV) e é resistente ao halogénio.

O pannel de magnésio tem inúmeras aplicações na construção de imóveis residenciais e comerciais tais como como gabinetes de escritórios, museus, lojas, cinemas, salas de acústica, hospitais, escolas, laboratórios, estações de metro, aeroportos, oficinas industriais, túneis, casas de banho, qualquer divisão residencial, portas corta fogo, entre outras, sendo também, considerada a melhor opção para a construção modular [51].



Figura 19 – Exemplo de placas de MGO. Adaptado [51]

As placas de MGO são mais rígidas do que as de gesso cartonado usadas em Drywall, e são semelhantes às placas de cimento Portland. Relativamente à sua trabalhabilidade, podem ser cortadas com uma serra elétrica, perfuradas e fixadas num conjunto com outras placas, tratando-se de um produto fácil de instalar. Como qualquer pannel de revestimento, o pannel de MgO pode absorver água, mas, se for corretamente fabricado, o seu desempenho

não é afetado. Assim, pode ser usado tanto para ambientes internos ou externos, ou em locais húmidos, como as casas de banho [52].

Na China, há recursos extremamente abundantes de óxido de magnésio, sendo que as reservas já verificadas são cerca de 3 mil milhões de toneladas, representando um terço das reservas mundiais de óxido de magnésio (MgO) e ocupam o primeiro lugar no mundo, assim como os recursos de cloreto de magnésio, oferecendo garantia suficiente de matérias-primas para o desenvolvimento do comércio de cimento de oxicloreto de magnésio[53].

Na Austrália, o aumento no custo de materiais convencionais, como aço, betão, madeira e tijolos, devido ao imposto de carbono proposto pelo governo, combinado com escassez de habilidades no setor de construção, criou desafios. Esses problemas incentivaram a indústria de construção civil a encontrar materiais alternativos e sistemas de construção rentáveis. Atualmente, há um interesse crescente na utilização de nova geração de compósitos a partir de materiais reciclados e outros recursos renováveis para substituir os materiais estruturais e não-estruturais menos ecológicos para habitação e construção. As muitas vantagens destes materiais compostos incluem: preocupação ambiental (recursos renováveis, recicláveis e biodegradáveis), baixo consumo de energia, baixo custo, peso leve e boas propriedades mecânicas específicas. Estes compósitos de nova geração têm inúmeras vantagens potenciais na construção de casas pré-fabricadas, tais como melhor um melhor controlo de qualidade, melhoria na questão da saúde e segurança dos trabalhadores e tempos de construção mais rápidos [19].

4.2.3 OSB – Pannel aglomerado de partículas longas e orientadas

Orientated Strand Board (OSB) é um pannel em forma de esteira feito de fios cortados, toros de madeira redondos de pequeno diâmetro de rápido crescimento, e colados com um aglutinante sob calor e pressão.

A considerável resistência à flexão do OSB vem da fibra de madeira ininterrupta, entrelaçando os longos fios e orientando-os nas camadas superficiais. Tipicamente, as camadas superficiais são alinhadas na direção longitudinal do pannel para que a resistência seja superior, à flexão e rigidez, nesta direção. As camadas internas podem ser orientadas aleatoriamente ou alinhadas em cruz com a camada superficial. Os ligantes de resina à prova

de água, combinados com os fios, proporcionam resistência interna, rigidez e resistência à humidade [54].

Os painéis OSB (Figura 20) são produtos utilizados para aplicações estruturais, como paredes, forros, pisos, componentes de vigas estruturais, entre outras, tendo em vista as suas características de resistência mecânica e de boa estabilidade dimensional [55].

O procedimento industrial garante um dos mais elevados rendimentos de aproveitamento das matérias primas. A casca, a serradura e as farpas são valorizadas na produção energética ou utilizadas no fabrico de painéis. Por outro lado, os resíduos de corte e os painéis recusados podem ser utilizados nas caldeiras industriais de biomassa [56].



Figura 20 – Exemplo de uma placa OSB. Adaptado [43]

Classes de OSB

A norma EN 300 define cada uma das 4 classes de OSB em função do respetivo ambiente de utilização e das respetivas características mecânicas e propriedades físicas:

- OSB/1 - Painéis para usos gerais, incluindo decoração interior e mobiliário, em ambiente seco.
- OSB/2 - Painéis para fins estruturais, em ambiente seco.
- OSB/3 - Painéis para fins estruturais em ambiente húmido.
- OSB/4 - Painéis para elevado desempenho estrutural em ambiente húmido.

Caso as placas OSB sejam escolhidas como acabamento final, as superfícies expostas e as juntas deverão ser devidamente tratadas. Usualmente, nestas funções de mero revestimento exterior, apesar de menos exigentes que as funções estruturais, também deverá ser usada a classe adequada. Como todos os derivados de madeira, as placas OSB respeitam os conceitos de sustentabilidade e ecoeficiência:

- são alternativas muito económicas e estáveis à utilização de madeira maciça;
- exigem menos energia no fabrico do que outros materiais de construção;
- é um material completamente reciclável.

Segundo o EC 5 (EN 1995-1-1) [57], para que os elementos estruturais de madeira, tais como o OSB ou a madeira lamelada colada, possam alcançar uma vida útil de várias dezenas de anos, há dois aspetos fundamentais a serem levados em conta:

- a qualidade e características da madeira;
- a qualidade e características dos produtos associados, tais como colas, conectores e parafusos.

O OSB não é normalmente atacado por insetos da madeira comuns em climas temperados, mas os painéis são mais suscetíveis ao ataque de fungos em condições húmidas prolongadas. As placas produzidas a partir de madeira de pinheiro possuem mais resistência a estes agentes biológicos.

A NP EN 335-2 (1994) refere explicitamente que não deve ser feita distinção entre a madeira maciça e a madeira lamelada-colada, quanto à durabilidade face a agentes biológicos. Dessa forma, a durabilidade do OSB em relação aos ataques biológicos pode ser considerada similar à da madeira sólida usada para o seu fabrico.

A durabilidade da madeira usada no fabrico de placas OSB e outras madeiras lameladas-coladas deve ser adequada à classe de risco biológico. A norma NP EN 335-2 (1994) estabelece classes de risco para aplicações em ambiente terrestre, baseadas sobretudo no risco de ataque por fungos. Em Portugal deve ser tido em consideração um risco de ataque por térmitas, de desenvolvimento dos fungos e risco de ataque por carunchos na generalidade das situações.

Classes de risco

A norma EN 335-1 define as seguintes classes de risco a que a madeira ou derivados com fins estruturais poderá estar sujeita [58]:

Classe de Risco 1 – O elemento estrutural está revestido, protegido das intempéries e não se encontra exposto à humidade:

- Conteúdo de humidade inferior a 20 %, usualmente originada por condições atmosféricas equivalentes a 20 °C e 65 % de humidade relativa;
- Sem risco de ataque de fungos podendo ser atacada por coleópteros e ocasionalmente por térmitas, conforme a região geográfica

Classe de Risco 2 – O elemento estrutural está revestido e protegido das intempéries:

- Conteúdo de humidade superior a 20 % ocasionalmente, originada por condições atmosféricas equivalentes a 20 °C e 90 % de humidade relativa;
- Risco de ataque de fungos cromogéneos ou xilófagos. Risco de ataque por insetos idêntico ao da classe 1.

Classe de Risco 3 – O elemento estrutural está descoberto, mas não se encontra em contacto com o solo e é submetido à humidade frequentemente:

- Conteúdo de humidade superior a 20 %;
- Maior probabilidade de ataque pelos mesmos organismos da classe 2.

Classe de Risco 4 – O elemento estrutural está em contacto com o solo ou com água doce:

- Conteúdo de humidade superior a 20 % permanentemente;
- Para além dos organismos referidos nas situações anteriores, possibilidade de ataque por fungos e maior risco de ataque por térmitas, conforme a região geográfica;

Classe de Risco 5 – O elemento estrutural está em permanente contacto com água salgada:

- Conteúdo de humidade superior a 20 % permanentemente.
- Para além dos casos anteriores, deverá ter-se em conta, o risco de ataque por xilófagos marinhos.

Para as duas primeiras classes o tratamento superficial com um inseticida/fungicida por pincelagem, imersão ou duplo vácuo é suficiente, podendo ser também utilizado para a classe de risco 3 desde que a sua superfície após o tratamento seja protegida com tinta ou verniz. O único tipo de tratamento eficaz para as classes de risco 4 e 5 onde a madeira se encontra em contacto com o solo é o processo de impregnação em autoclave por vácuo e pressão, este

tipo de tratamento é estável, fixando-se permanentemente às fibras lenhosas, não sendo volátil, não tem qualquer odor e permite a aplicação de qualquer acabamento posterior.

Classes de duração das cargas

A duração das cargas influencia significativamente a resistência da madeira, de tal forma que quanto maior a duração, menor a resistência. Este é um fator de grande importância no cálculo de estruturas de madeira. Para ter em conta este efeito na resistência, estabeleceram-se 5 classes de duração da carga na Tabela 16 através do EC5 [57], às quais é necessário corresponder as ações em particular.

Tabela 16 – Classes de duração de carga afetas à resistência da madeira de acordo com EC5. Adaptado [57].

Classe de duração	Duração acumulada	Exemplos da carga
Permanente	Mais de 10 anos	Peso próprio, divisórias
Longa Duração	6 Meses - 10 anos	Apoios
Média Duração	1 Semana - 6 meses	Sobrecarga de utilização
Curta Duração	Menos de 1 semana	Neve, vento
Instantânea	Alguns segundos	Sismo

4.2.4 PMC – Painel madeira-cimento

Os painéis madeira-cimento, ver Figura 21, são constituídos por partículas ou fibras de biomassa vegetal (agregado), cimento (aglomerante mineral), aditivo químico e água, sendo estes consolidados sob pressão a temperatura ambiente. Os aditivos químicos e minerais são aplicados com objetivo de acelerar a cura do cimento. Os principais tipos de aditivos químicos utilizados são o cloreto de cálcio, silicato de sódio e hidróxido de sódio, em quantidades que podem variar de 3,0% a 5,0% em relação ao peso do cimento. Os painéis cimento-madeira são produtos de boa aceitação e de grande aplicabilidade na construção civil, principalmente nos países da Europa e da Ásia, por serem bons isolantes térmicos e acústicos, virtualmente incombustíveis, resistentes ao ataque de agentes bio degradantes, apresentam alta estabilidade dimensional e são de fácil trabalhabilidade. A principal limitação na produção dos compósitos cimento-madeira é a incompatibilidade química entre algumas espécies de madeira e o aglomerante mineral, devido à presença de substâncias

químicas, como: compostos fenólicos, ácidos e açúcares, que retardam ou inibem a cura e o endurecimento do cimento, podendo prejudicar as propriedades finais dos painéis [59].

A sua aparência não é homogênea e combina a flexibilidade da madeira com a resistência e durabilidade do cimento. Pode ser calibrado/lixado e apresenta partículas de madeira visíveis na superfície do painel [47].

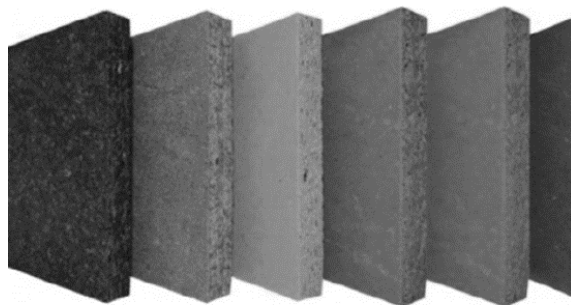


Figura 21 – Exemplo de placas de PMC. Adaptado [60]

O processo de fabrico dos painéis tem início no descasque dos troncos de madeira de pinho que, depois são cortados e laminados, transformando a sua madeira em aparas calibradas (classificadas em finas e grossas). No misturador, colocam-se as aparas, a água, os aditivos e o cimento, formando uma massa, designada de mistura. Esta mistura é transportada para a máquina de conformação onde se forma um colchão de espessura uniforme. Depois é prensado, encaminhado para uma estufa de endurecimento que tem como finalidade acelerar o processo de cura. Por último os painéis passam por um túnel de secagem a fim de se retirar a humidade em excesso, encontrando-se assim finalizado em termos de produção. Não contém compostos voláteis perigosos e é isento de sílica, asbestos (amiantos) e formaldeído. Devido ao seu peso elevado possui boas características de isolamento sonoro, evita a propagação do fogo e não se degrada com a ação de organismos vivos como fungos, térmitas ou qualquer tipo de insetos. Os recintos húmidos interiores são também áreas ideais para a utilização do painel devido à sua resistência à humidade, como a aplicação em complexos de piscinas, balneários e instalações sanitárias. Em zonas húmidas é recomendado aplicar tinta ou verniz [44].

4.2.5 PGC – Paineis gesso cartonado

O gesso é um material que apresenta propriedades muito atrativas para a produção de materiais de construção, tais como: endurecimento rápido, propriedades mecânicas compatíveis com os esforços atuantes, boa aderência aos substratos, ausência de retração por secagem e excelente acabamento superficial. Além destas vantagens podem destacar-se também as excelentes propriedades térmicas e acústicas, bem como a resistência ao fogo [61]. Uma das maiores desvantagens no uso do gesso como material de construção é a diminuição de resistência na presença de água ainda que, atualmente, este aspecto seja minimizado mediante a incorporação de aditivos hidrófugos, como acontece nos painéis de gesso laminado[62].

Os painéis de gesso laminado (Figura 22), também conhecidos como painéis de gesso cartonado, são um produto cada vez mais utilizado na construção de divisórias interiores e no revestimento e isolamento de paredes e tetos.

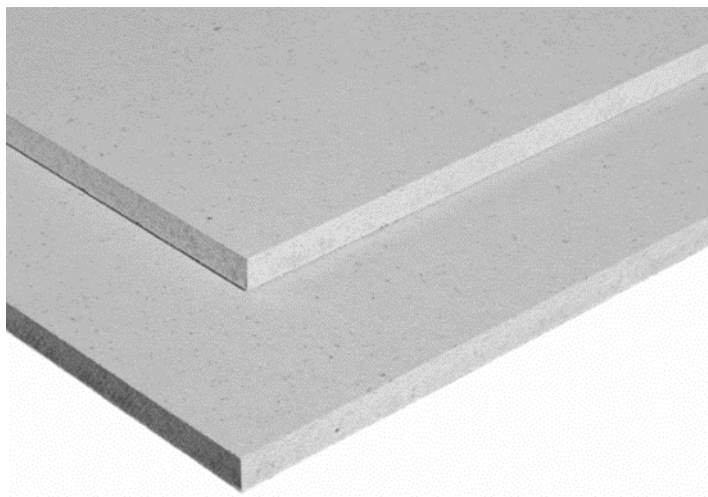


Figura 22 – Exemplo de painéis de gesso cartonado. Adaptado [63]

Os painéis são fabricados industrialmente mediante um processo de laminação contínua de uma mistura de gesso, água e aditivos entre duas lâminas de cartão, de modo a cumprir a Norma EN 520:2004+A1:2009, apresentando-se sob a forma de painéis retangulares com espessuras e dimensões variáveis. O painel de gesso hidrófugo é tratado com um agente hidrófugo para diminuir a absorção de água, sendo adequado para zonas húmidas. Assim, está indicado para todo o tipo de espaços interiores, desde cozinhas a casas de banho, podendo ser revestido com azulejos ou material similar. Em função da capacidade

de absorção de água, segundo a norma EN 520:2004+A1:2009, estes painéis podem ser designados como sendo do tipo H1, H2 e H3, onde é demonstrado na Tabela 17 [63].

Tabela 17 – Classificação dos painéis de gesso cartonado quanto à sua capacidade de absorção de água. Adaptado [63].

Classes de Absorção de Água	Absorção Total de Água (EN 520:2004+A1:2009)
H1	$\leq 5,0\%$
H2	$\leq 10,0\%$
H3	$\leq 25,0\%$

4.3 Desempenho dos Painéis

A construção de painéis autoportantes tem vindo a ser aplicada cada vez mais em situações que requerem níveis adequados de isolamento acústico e térmico, para além de elevada resistência, rigidez e redução do peso próprio. A obrigatoriedade de entrega de um certificado acústico em conjunto com as telas finais, à entidade licenciadora para o efeito de licenciamento acústico de edifícios, fez com que o mercado se dinamizasse para a qualidade e conforto acústico dos ocupantes. Com a crescente consciencialização relativamente aos custos energéticos e um aumento ativo na redução de custos de energia por parte dos consumidores através da utilização de equipamentos energeticamente mais eficazes e redução do consumo de eletricidade nas habitações, o papel do isolamento térmico dos edifícios tem ganho maior destaque, como mais uma opção de redução de custos a médio/longo prazo. As perdas de energia podem ser reduzidas com um aumento de isolamento térmico e com a adequada adoção de sistemas de ventilação de forma a criar sistemas fechados de circulação de calor no edifício. As boas propriedades de reação ao fogo, como a de prevenção de incêndio, propagação de chamas e produção de fumos, são qualidades quase obrigatórias nos materiais utilizados. Em suma, estes não devem possuir apenas resistência suficiente para evitar o colapso das estruturas, como também, serem um bom isolador térmico e com boa estanqueidade, de modo a não contribuir para a propagação e desenvolvimento de um eventual incêndio [64].

4.3.1 Comportamento Acústico

No estudo do comportamento acústico aplicado a edifícios é frequente considerarem-se três situações distintas [65]:

- O estudo da propagação de sons entre dois espaços limitados por uma separação física, frequentemente denominado de isolamento acústico, que depende preferencialmente da massa e estanquidade dos vários elementos que separam os dois locais;
- O estudo da propagação do som no interior de um espaço fechado, frequentemente denominado de correção acústica ou do condicionamento acústico do local. Este estudo visa dotar estes espaços fechados de características adequadas para a obtenção de um ambiente acústico adequado ao seu volume e às suas funções. Neste caso a geometria do espaço, o tipo de revestimentos interiores e o tipo de recheio existente são variáveis importantes do processo;
- O estudo da propagação do som por via sólida. Os sons ou ruídos de percussão são provenientes de choques ou de outras solicitações mecânicas aplicadas diretamente nos elementos de construção. Estes sons propagam-se acompanhados de vibrações da própria construção. São exemplos habituais de fontes de ruído de percussão as marteladas em paredes, o arrastamento de moveis, passos em movimento, etc.

Num elemento de separação simples, considerando que este é constituído por um conjunto de massas justapostas com possibilidade de deslocamentos independentes e considerando que as forças de amortecimento são nulas, o isolamento sonoro aumenta de forma próxima linear com acréscimos de 6 dB por cada duplicação da massa ou por cada duplicação da frequência do som. Esta variação segue uma lei, designada de Lei da Massa Teórica ou Lei da Frequência Teórica (Figura 23).

Contudo, a rigidez e o amortecimento do elemento condicionam o seu modo de vibração, tornando possível uma maior transmissão de energia sonora nas frequências próprias da vibração do elemento. O isolamento sonoro pode aumentar caso se divida o elemento simples em vários painéis separados por caixa de ar, ou por outros materiais dispostos em forma de sandwich.

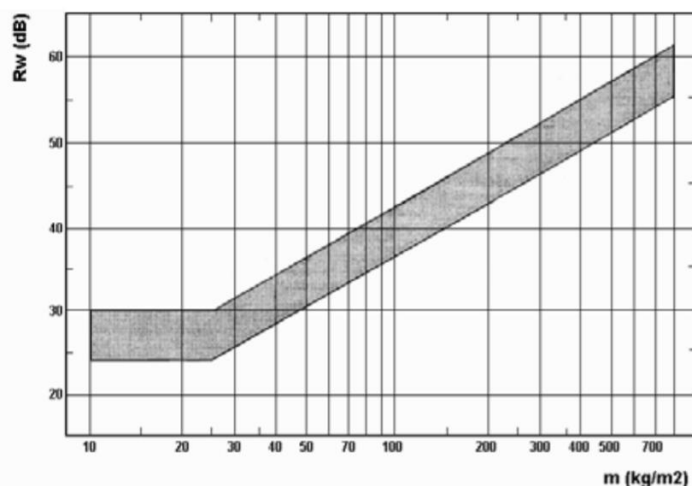


Figura 23 – Gráfico da Lei da Massa. Adaptado [66].

Segundo Davies [27], o som é algo que ouvimos quando o movimento de partículas em materiais, líquidos e gases é registado pelo ouvido como variações de pressão. As características básicas do som são a frequência e a amplitude. A unidade para frequência é o hertz (Hz = ciclos por segundo). Os adultos têm uma faixa de audição de 20 Hz a 20000 Hz, embora o nosso corpo também seja influenciado pelo som fora dessa faixa auditiva. O infrassom está no intervalo abaixo de 20 Hz e o ultrassom está acima de 20000 Hz. O ouvido humano responde à pressão sonora, que é medida em unidades de Pa (N/m²). A pressão sonora mais baixa que um ouvido humano, em média, pode detetar é de cerca de 2×10^{-5} Pa e o limite de dor é de cerca de 20 Pa = 120 dB. O decibel (dB) é um valor logarítmico que não pode ser adicionado ou subtraído da mesma maneira como os valores lineares.

O som pode ser absorvido, transmitido ou refletido. Quando um limite de uma divisória, e.g. um telhado, chão ou parede, é atingido por uma onda sonora, alguma da energia sonora é refletida, alguma é absorvida dentro do material e outra é transmitida através dele.

A proporção que é refletida, absorvida ou transmitida depende da forma do material ou da construção atingida pela onda sonora e a frequência do som. Com base nisso, definem-se três parâmetros acústicos:

- Coeficiente de absorção, α = (som absorvido + som transmitido) / (som incidente)
- Coeficiente de reflexão, ζ = (som refletido) / (som incidente)
- Coeficiente de transmissão, τ = (som transmitido) / (som incidente)

O som transmitido pelo ar gerado numa sala ou num pavilhão industrial pode ser transferido para salas adjacentes ou para o ambiente externo através de diferentes caminhos de transmissão, por exemplo, através de paredes divisórias, pavimentos, estruturas de edifícios, janelas, portas e condutas. A sua redução, através de todos esses caminhos, é chamada de isolamento acústico.

A medida básica do isolamento acústico fornecido por uma partição é denominada *índice de redução de ruído*, R (dB) ou *perda de transmissão de som*, como mostra a equação (11).

$$R=10 \log 1/\tau \quad (11)$$

Onde τ = coeficiente de transmissão.

R refere-se a valores medidos em laboratório. A seguinte expressão (equação (12)) refere-se ao índice de redução de som entre duas salas com um campo sonoro difuso:

$$R=L_S-L_R-10 \log \frac{A}{S} \quad (12)$$

Onde

- L_S = nível do som na divisória da origem (dB);
- L_R = nível do som na divisória recetora (dB);
- S = área da divisão (m^2);
- A = área de absorção na divisória recetora (m^2).

O coeficiente de transmissão depende da frequência e do ângulo de incidência das ondas sonoras. Geralmente, não há apenas um componente de onda única, em vez disso, o campo de som numa divisória é mais bem descrito como um campo de som difuso. O campo sonoro difuso ideal é comparado a um campo de ondas sonoras planas com igual intensidade, que se propagam com a mesma probabilidade em todas as direções.

A regulamentação em vigor resume-se essencialmente ao Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE) emitido no Decreto-Lei nº 129/2002 de 11 de maio de 2002, atualizado pelo Decreto-Lei nº 96/2008 de 9 de junho de 2008, veio estabelecer os requisitos acústicos dos edifícios, com vista a melhorar as condições de qualidade acústica dos mesmos. Este tornou obrigatória a apresentação do relatório acústico nas seguintes situações [8]:

- Edifícios habitacionais e mistos, e unidades hoteleiras;
- Edifícios comerciais e de serviços, e partes similares em edifícios industriais;
- Edifícios escolares e similares e de investigação;
- Edifícios hospitalares e similares;
- Recintos desportivos;
- Estações de transporte de passageiros;
- Auditórios e salas.

Para obter o máximo isolamento acústico, deve-se ter em conta no dimensionamento dos painéis, o local onde este irá ser montado para determinar fontes sonoras, o meio de propagação do som (via aérea ou percussão), a sua frequência e posteriormente fabricar ou escolher o painel com as dimensões adequadas para esse ambiente [64].

Desempenho acústico - Critério

O indicador $D_{nT,w}$ caracteriza o isolamento a sons de condução aérea, entre compartimentos de um fogo e quartos ou zonas de estar de outro fogo adjacente. O artigo 5º do RRAE, estabelece as seguintes exigências para elementos de construção que separem:

- um fogo de quartos ou salas de outro fogo: $D_{nT,w} \geq 50$ dB;
- as circulações comuns de um edifício dos quartos ou salas dos fogos adjacentes: $D_{nT,w} \geq 48$ dB;
- $D_{nT,w} \geq 40$ dB (se o local emissor for um caminho de circulação vertical, quando o edifício seja servido por ascensores);
- $D_{nT,w} \geq 50$ dB (se o local emissor for uma garagem de estacionamento automóvel);
- locais destinados a comércio, indústria e serviços de quartos ou zonas de estar dos fogos adjacentes: $D_{nT,w} \geq 58$ dB.

De acordo com a norma brasileira ABNT NBR 15575-4, o sistema de vedação vertical interna deve apresentar um desempenho mínimo de diferença padronizada de nível ponderada, $D_{nT,w}$, conforme a Tabela 18.

A Tabela 19 apresenta uma estimativa simplificada do grau de clareza da fala num recinto adjacente em função do isolamento acústico e do nível do ruído no ambiente.

Tabela 18 – Valores mínimos da diferença padronizada de nível ponderada, $D_{nT,w}$, entre ambientes.

Adaptado [16]

Elemento	$D_{nT,w}$ [dB]
Parede entre unidades habitacionais autônomas, nas situações onde não haja ambiente dormitório	≥ 40
Parede entre unidades habitacionais autônomas (parede de geminação), caso pelo menos um dos ambientes seja dormitório	≥ 45
Parede cega de dormitórios entre uma unidade habitacional e áreas comuns de circulação eventual, como corredores e escadaria nos pavimentos	≥ 40
Parede cega de salas e cozinhas entre uma unidade habitacional e áreas comuns de circulação eventual como corredores e escadaria dos pavimentos	≥ 30
Parede cega entre uma unidade habitacional e áreas comuns de permanência de pessoas, atividades de lazer e atividades desportivas, como salas de ginástica, salão de festas, salão de jogos, banheiros e vestiários coletivos, cozinhas e lavandarias coletivas	≥ 45
Conjunto de paredes e portas de unidades distintas separadas pelo hall ($D_{nT,w}$ obtida entre as unidades).	≥ 40

Tabela 19 – Influência da $D_{nT,w}$ sobre a clareza da fala, para ruído no ambiente interno em torno de 35 a 45 dB. Adaptado [16].

Clareza de fala alta no recinto adjacente	Isolamento sonoro, $D_{nT,w}$ [dB]
Claramente audível: ouve e entende	35
Audível: ouve, entende com dificuldade	40
Audível: não entende	45
Não audível	≥ 50

Um painel sandwich atua acusticamente como algo intermediário entre uma parede única e outra dupla, tornando assim essencial calcular a massa superficial para a obtenção do índice de isolamento de redução sonora, através da Lei da Massa.

O cálculo da massa superficial m (kg/m^2) é feito através da equação (13):

$$m = 2 \times e_l \times d_l + e_n \times d_n \quad (13)$$

Onde:

- e_l – espessura da lâmina [m];
- d_l – densidade da lâmina [kg/m^3];
- e_n – espessura do núcleo [m];
- d_n – densidade do núcleo [kg/m^3].

Na Tabela 20 são apresentados os valores obtidos das massas superficiais dos painéis sandwich com núcleo em XPS tendo em conta a respetiva lâmina.

Tabela 20 – Valores da densidade das lâminas e massa dos painéis sandwich com núcleo em XPS.

Lâminas	MDF	MGO	OSB	PMC	PGC
Densidade (kg/m^3)	770	950	620	1350	700
m (kg/m^2)	18,4	22,0	15,4	30,0	17,0

Com os resultados obtidos da massa superficial de cada painel sandwich, atribui-se o valor do índice de redução sonora, R_w , através do gráfico da Figura 23. Para valores de massa superficial entre 10,0 e 25,0 kg/m^2 o índice de redução sonora é constante. Portanto, para os painéis MDF, MGO, OSB e PGC definiu-se R_w igual a 27 dB. Enquanto que, para o painel sandwich PMC, por apresentar uma massa superficial superior ao intervalo de massas referido, definiu-se R_w igual a 28 dB. Como os índices de redução sonora dos painéis sandwich são inferiores a 45 dB não se faz uma correção deste valor.

O cálculo do isolamento sonoro normalizado utilizado na legislação portuguesa, $D_{nT,w}$ (dB), à qual se relaciona com R_w , através da equação (14) [67]:

$$D_{nT,w} = R_w + 10 \log \frac{V}{6,25 \times S \times T_0} \quad (14)$$

Onde:

- V – volume do local recetor [m^3];
- S – área do elemento que separa o local recetor do emissor [m^2];
- T_0 – tempo de reverberação de referencia [s]; para compartimentos de habitação ou com dimensões comparáveis, $T_0 = 0,5$ s.

Admitindo uma casa de banho com uma área de 12,0 m² e com um pé direito de 3,0 m, em que uma das paredes tem 4,0 m de comprimento e que está junto a uma zona de circulação comum do mesmo piso. Portanto, o volume do local do recetor é de 36 m³ e a área do elemento que separa o local recetor do emissor é de 12,0 m². Este exemplo será alvo de estudo para determinar o isolamento sonoro normalizado. Perante esta situação e assumindo como caso de estudo, os valores do isolamento sonoro normalizado mantêm-se iguais, aproximadamente. Através dos critérios estabelecidos, tanto pela norma portuguesa como pela norma brasileira, concluiu-se que o comportamento acústico dos painéis sandwich não é satisfatório. E comparando com os valores de isolamento sonoro da Tabela 19 concluiu-se ainda que som é claramente audível entre compartimentos usando os painéis sandwich como paredes divisórias interiores.

4.3.2 Comportamento ao Fogo

Este subcapítulo concentra-se nos aspetos construtivos em relação ao fogo, sendo que os painéis classificados para resistir ao fogo podem oferecer a melhor solução de projeto quando são usados num contexto de separação. O objetivo consiste em mostrar como as componentes de um painel, juntamente com a engenharia de montagem do painel, influenciam o desempenho quando expostos ao fogo e satisfaz as rigorosas exigências de incêndio.

Hoje em dia, há uma tendência de avaliar o risco de incêndio de uma habitação como um todo e não no desempenho das componentes individuais. Um aspeto importante dessa avaliação é o fornecimento de medidas ativas de proteção contra incêndio, como os detetores de fumo que atuam em conjunto com os *sprinklers*. É claro que, a junção destas medidas, pode exercer uma influência profunda no resultado de um acidente causado por um incêndio. No entanto, a resistência passiva ao fogo, neste caso, na forma de paredes divisórias resistentes, prende-se na segurança contra incêndio que por si só inclui a segurança dos ocupantes, prevenção de perda e proteção ambiental. Estes objetivos são decididos pelo projetista, o dono de obra e pela aprovação das autoridades da construção. Todos os intervenientes de uma edificação, ocupantes, bombeiros e os membros públicos, são os que se encontram em risco de fogo.

O Decreto-Lei n.º 220/2008, de 12 de novembro, engloba as disposições regulamentares de segurança contra incêndio aplicáveis a todos os edifícios e recintos, distribuídos por 12 utilizações-tipo, sendo cada uma delas, por seu turno, estratificada por quatro categorias de risco de incêndio. Nos termos da alínea a) do nº1 do artigo 3.º, estão sujeitos ao regime de segurança contra incêndios todos os edifícios, ou suas frações autónomas, qualquer que seja a utilização e respetiva envolvente. O mesmo decreto-lei é de aplicação geral a todas as utilizações de edifícios e recintos, visando em cada uma delas [68]:

- Reduzir a probabilidade de ocorrência de incêndios;
- Limitar o desenvolvimento de eventuais incêndios, circunscrevendo e minimizando os seus efeitos, nomeadamente a propagação do fumo e gases de combustão;
- Facilitar a evacuação e o salvamento dos ocupantes em risco;
- Permitir a intervenção eficaz e segura dos meios de socorro.

Nos termos do artigo 9.º, os produtos de construção, também incluídos os módulos de sistemas pré-fabricados, são qualificados em termos de reação (Tabela 21) e resistência ao fogo (7 classes) e constam nos anexos do mesmo decreto-lei.

Tabela 21 – Classes de reação ao fogo para produtos de construção, excluindo pavimentos [68].

Classes de desempenho	Fatores de classificação	Classificação complementar
A1	ΔT , Δm , t_f e PCS	-
A2	ΔT , Δm , t_f , PCS, FIGRA, LFS e THR_{600s}	Produção de fumo (s1, s2 ou s3) e gotículas ou partículas incandescentes
B	FIGRA, LFS e THR_{600s} e F_s	(d0, d1 ou d2)
C	FIGRA, LFS e THR_{600s} e F_s	
D	FIGRA e F_s	Gotículas ou partículas incandescentes (aprovação ou reprovação)
E	F_s	
F	Desempenho não determinado	

A classificação de desempenho de resistência ao fogo padrão para produtos de construção é a constante dos quadros seguintes e atende aos seguintes parâmetros, dependendo do elemento de construção em questão, como mostra a Tabela 22.

Tabela 22 – Classes de resistência ao fogo padrão para produtos de construção. Adaptado [68].

Constante	Parâmetros
R	Capacidade de suporte de carga
E	Estanquidade a chamas e gases quentes
I	Isolamento térmico
W	Radiação
M	Ação mecânica
C	Fecho automático
S	Passagem de fumo
P ou PH	Continuidade de fornecimento de energia e ou de sinal
G	Resistência ao fogo
K	Capacidade de proteção contra o fogo

A classe de desempenho de reação ao fogo dos materiais de construção baseia-se em ensaios com critérios normalizados, dependendo dos parâmetros apresentados na Tabela 23.

No âmbito da classificação complementar, refira-se que a principal causa de morte num incêndio é a intoxicação devido à exposição ao fumo. A taxa de produção de fumo (velocidade de produção de fumo por um produto da construção durante um determinado período de tempo) está parametrizada em três categorias [65]:

- s1: $\leq 30 \text{ m}^2/\text{s}^2$ [escassa e lenta opacidade];
- s2: $\leq 180 \text{ m}^2/\text{s}^2$ [opacidade média];
- s3: não cumpre os requisitos de s1 ou s2 [elevada e rápida opacidade].

So é necessário proceder ao ensaio de classificação de materiais de classe B a D.

Relativamente às condições de propagação do incêndio, é importante a classificação complementar no que diz respeito à produção de gotículas incandescentes. a classificação é parametrizada em três categorias:

- d0: Não se reproduzem gotículas/partículas em chamas durante um intervalo de 600 segundos, quando se ensaiam segundo a norma EN13823;

- d1: Não se reproduzem gotas/partículas em chamas com uma persistência superior a 10 segundos, durante um intervalo de 600 segundos, quando se ensaiam segundo a norma EN13823;
- d2: Material que não cumpre os requisitos de d0 ou d1.

Tabela 23 – Fatores de influência na classificação de desempenho de reação ao fogo para produtos de construção[68].

ΔT	Aumento da temperatura [$^{\circ}\text{C}$];
Δm	Perda de massa [%];
t_f	Tempo de presença de chama (duração de chamas persistentes) [s];
PCS	Poder calorífico superior [MJ kg^{-1} , kg^{-2} ou MJ m^{-2} , consoante o caso];
FIGRA	Taxa de propagação de fogo [W s^{-1}];
$\text{THR}_{600\text{s}}$	Calor libertado em 600s [MJ];
LFS	Propagação lateral das chamas (comparando com o bordo da amostra) [m];
SMOGRA	Taxa de propagação de fumo [m^2s^{-2}];
$\text{TSP}_{600\text{s}}$	Produção total de fumo em 600s [m^2]
F_s	Propagação das chamas [mm];
Libertação de gotículas ou partículas incandescentes;	
Fluxo crítico	Fluxo radiante correspondente à extensão máxima da chama (só para pavimentos).

Segundo Davies [27], é na fase inicial de um incêndio, onde os efeitos mais importantes são a do fumo e a combustão dos produtos de construção. Muitas vezes, o fumo é a primeira evidência de incêndio detetável pelos ocupantes e provavelmente será a primeira causa de alarme e, possivelmente, de pânico. Quando presente, o fumo tende (na ausência de correntes de ar fortes) a acumular-se ao nível do teto, preenchendo o espaço de cima para baixo. Quando se estende até à altura média dos ocupantes, produz desconforto nos olhos e dificuldade na respiração, e ambos interferirão no esforço dos ocupantes para encontrar o caminho para as saídas. A causa mais comum de morte é a inalação de monóxido de carbono.

No cenário descrito acima, as propriedades de reação ao fogo são importantes e é desejável, sempre que possível, reduzir a quantidade de combustíveis envolvidos num incêndio na sua fase inicial de desenvolvimento e, assim, reduzir a quantidade de fumo gerado. O fogo encontra-se numa fase totalmente desenvolvida quando todas as fontes de combustível se encontram envolvidas no incêndio. Isto faz com que a temperatura dos gases de combustão, estejam acima de 650 °C, e leve a um aumento súbito da radiação emitida pelo fogo, podendo atingir temperaturas superiores a 1000 °C. No entanto, os incêndios reais variam muito e a temperatura máxima atingida e a duração, dependem principalmente de oxigênio, da quantidade do combustível e do isolamento térmico.

Quando um incêndio ocorre num espaço fechado, os gases quentes libertados sobem e formam uma camada que, na ausência de ventilação ou supressão de fogo, primeiro flui sob todo o teto e depois intensifica-se ocupando todo o espaço. Esses gases quentes irradiam calor para baixo, aumentando a temperatura em baixo. O fogo tende a crescer em área e as chamas espalham-se para os combustíveis próximos. As chamas aumentam de altura até atingirem o teto (a menos que a altura entre o chão e o teto seja grande), onde são desviadas horizontalmente e irradiam para baixo, acelerando ainda mais o crescimento do fogo. Se o teto for combustível, pode inflamar e aumentar o volume de chamas e a velocidade de crescimento do fogo. Se o espaço tiver aberturas insuficientes, o fogo diminuirá à medida que ele recorrer a produtos de combustão já queimados, mas os gases serão extremamente tóxicos. A severidade do fogo, expressa como uma quantidade equivalente de resistência ao fogo e por vezes referida como tempo equivalente de exposição ao fogo, t_f , em minutos, é dada pela equação (15), tratando-se de uma relação empírica.

$$t_f = \frac{L}{\sqrt{A_w A_t}} \quad (15)$$

Onde:

- L representa a carga de fogo [kg] ou [MJ];
- A_w representa a área de ventilação [m²];
- A_t representa a área das paredes e do teto, excluindo as áreas de ventilação [m²].

Através da equação acima, é possível observar que a severidade do fogo é diretamente proporcional à carga do fogo. Na Tabela 24, apresentam-se alguns exemplos de densidades média de carga de fogo para cada tipo de ocupação em edifícios.

Tabela 24 – Densidades medias de carga de fogo por tipo de ocupação em edifícios. Adaptado [27].

Ocupação	Densidade média de carga de fogo (MJ/m ² por área de piso)
Habitação	780
Hospital	230
Armazém hospitalar	2000
Quarto de hotel	310
Escritórios	420
Lojas	600
Industrial	300
Industrial e armazém	1180
Livrarias	1500
Escolas	285

No caso específico do XPS, por se tratar de um material combustível, este apresenta um valor calorífico de 40 MJ/kg [27].

A falha estrutural inesperada dos painéis pode, em raras circunstâncias, representar uma ameaça à vida. A utilização dos painéis num edifício, dispostos na orientação vertical, com uma altura superior a 3,0 m, faz com que possa ser necessário adotar um suporte por suspensão na sua construção. Este conceito reconhece que um painel de sanduíche pode suportar o seu peso próprio, mas pode ser incapaz de o fazer num incêndio por causa da perda de resistência devido à separação dos revestimentos expostos ao fogo, em que o colapso pode ocorrer, como é mostrado na Figura 24.

A linha a tracejado representa a deformação que o painel pode sofrer, quando exposto ao fogo, estando este livre de se deslocar na vertical por não existir nenhuma restrição nesta direção. Para evitar esta consequência, os revestimentos do painel devem ser suspensos no topo (apoio superior) para que, num incêndio, os dois lados (lados exposto e não exposto) fiquem pendurados como cortinas, como mostra a Figura 25.

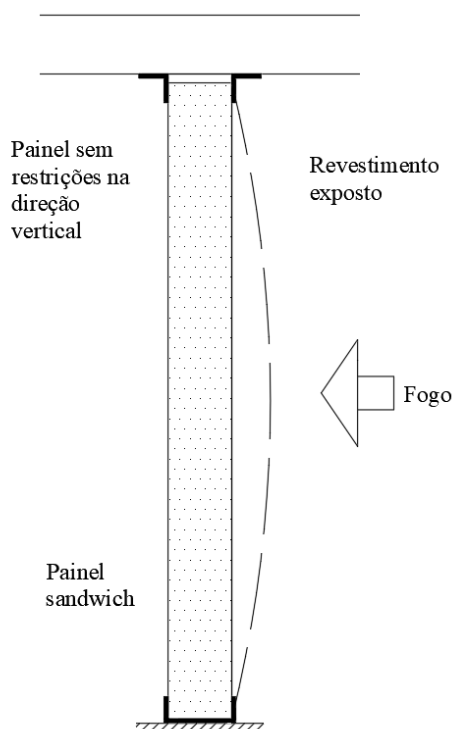


Figura 24 – Pannel sandwich interior suportado no apoio inferior. Adaptado [27].

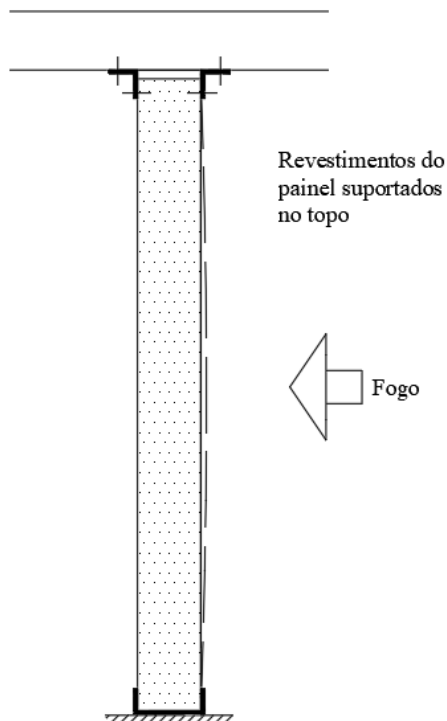


Figura 25 – Pannel sandwich interior suspenso no apoio superior. Adaptado [27].

Os fixadores para painéis altos podem agir localmente nas bordas dos painéis, conforme é mostrado na Figura 26 (a), ou continuamente em toda a largura do painel, como mostrado na Figura 26 (b). Por vezes, as fixações pontuais podem ser fixadas na borda frontal do painel, onde são ocultadas e parcialmente protegidas contra incêndio pelo painel, usando, por exemplo, grampos curtos de aço. Esta fixação permite o movimento livre para cima da cabeça do painel causado pela expansão do revestimento exposto ao fogo, mas evita que o revestimento caia mais tarde no incêndio.

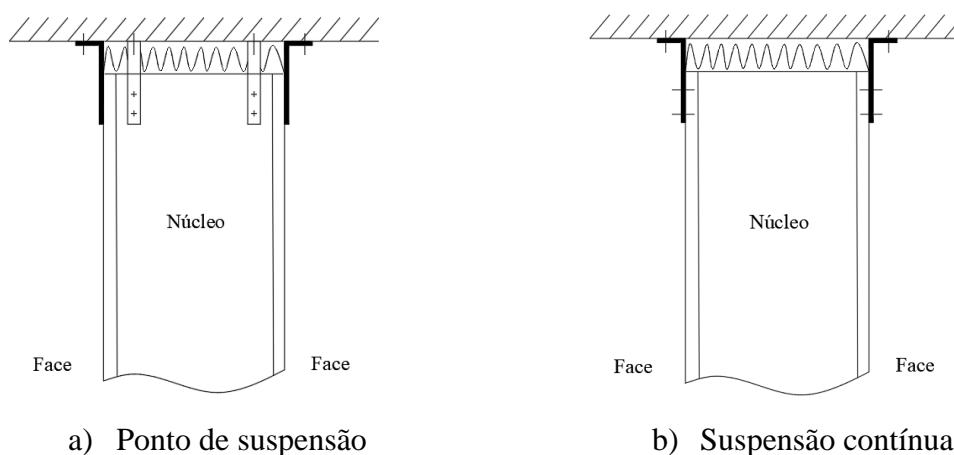


Figura 26 – Métodos de suspensão para painéis altos. Adaptado [27].

Para a fixação contínua, os fixadores de alinhamento podem ser colocados na parte externa das faces, por exemplo, usando cantoneiras de aço. Este tipo de fixação será adotado na solução final do painel sandwich. Além da força de tração no revestimento causada pelo peso próprio do painel, pode haver também forças causadas pela pressão interna do ar. Uma característica importante no conceito de suspensão é o uso de um isolamento ao fogo que preenche a lacuna entre o topo do painel e a parte de baixo do membro de suporte acima, tratando-se de um material resiliente.

Na Tabela 25 são apresentadas as classes de desempenho ao fogo para cada diferente tipo de painel, segundo a norma EN 13501-1. Estes painéis não foram selecionados com a intenção de apresentarem um elevado desempenho quando expostos ao fogo, sendo que existem painéis com classes de desempenho mais favoráveis quanto à resistência ao fogo. A sua escolha prendeu-se pelo facto destes materiais estarem disponíveis no mercado português e apresentarem uma boa relação entre qualidade e preço.

Tabela 25 – Classe de desempenho ao fogo para cada diferente tipo de painel.

Painel	XPS	MDF	MGO	OSB	PMC	PGC
Reação ao						
Fogo (EN 13501-1)	E	D-s2, d0	A2-s1, d0	D-s2, d0	B-s1, d0	A2-s1, d0

Como já foi dito anteriormente, o XPS não é um material que apresenta bom comportamento em relação, visto que é definido como um material de classe E, e portanto, origina partículas incandescentes. Comparando os restantes painéis, concluiu-se que o painel MGO e o PGC são os que apresentam melhor desempenho quando expostos ao fogo.

Segurança contra incêndio - Critério

Os materiais usados como núcleo dos painéis sandwich, segundo a norma ABNT NBR 15575-4, devem-se classificar-se em classes I, II A ou III A. Foi definido como um material de classe II A, por estar associado a locais de uso comum da edificação, em que o núcleo pode ser um material combustível. A Tabela 26 mostra para cada tipo de ensaio os critérios que o material do núcleo deve apresentar.

Tabela 26 – Classificação dos materiais de núcleo tendo como base o método EN 13823. Adaptado [16].

ISO 1182	EN 13823 (SBI)	EN ISO 11925-2 (exp.=30 s)
	FIGRA \leq 120 W/s	
	LSF < canto do corpo de prova	
Combustível	THR600s \leq 7,5 MJ	FS \leq 150mm em 60 s
	SMOGR \leq 180 m ² /s ²	
	TSP600s \leq 200m ²	

As paredes entre unidades habitacionais e que fazem de divisória com as áreas comuns nos edifícios multifamiliares, devem apresentar resistência ao fogo por um período mínimo de 30 minutos, considerando os critérios de avaliação relativos à estabilidade, estanquidade e isolamento térmico, no caso de edifícios até cinco pavimentos.

O tempo requerido de resistência ao fogo deve ser considerado, entretanto, conforme a ABNT NBR 14432, considerando a altura da edificação habitacional, para os demais casos.

Os painéis pré-fabricados devem satisfazer os requisitos da classe de desempenho A1, segundo a classificação da norma EN 13501-1.

4.3.3 Comportamento Térmico

O artigo 1.º do RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios [69] – refere que os edifícios devem ser concebidos de modo a que as condições de conforto térmico no seu interior possam ser asseguradas sem dispêndio excessivo de energia. É necessário salientar que este regulamento já não se encontra em vigor em Portugal, mas a premissa que foi apresentada foi tida em consideração na presente dissertação. A legislação que se aplica atualmente em Portugal é o *Sistema Certificação Energética dos Edifícios* (SCE) [9], que integra o *Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação* (REH), e o *Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços* (RECS).

Nos edifícios residenciais, industriais e públicos, a especificação do isolamento térmico é uma parte cada vez mais importante do projeto de um edifício. Na maioria dos países existem normas que especificam o menor grau de isolamento permitido.

A quantidade de energia necessária para obter um clima interno aceitável numa habitação depende principalmente de:

- Perdas de transmissão através de pisos, paredes e tetos;
- Perdas de ventilação em consequência de sistemas de ventilação e revestimento permeável.

As perdas por transmissão podem ser reduzidas aumentando o nível de isolamento térmico no revestimento do edifício. As perdas por ventilação podem ser reduzidas por um sistema de ventilação eficiente. O sistema de isolamento térmico também deve atender a outros requisitos, como:

- Evitar a condensação;
- Evitar temperaturas muito altas ou muito baixas;
- Permitir o rápido aquecimento dos quartos.

Entre as propriedades mais importantes do XPS estão o alto isolamento térmico e a capacidade de permitir a construção de estruturas extremamente herméticas.

Teoria do isolamento

Segundo Davies [27], por princípio, a transmissão térmica pode ocorrer de três maneiras diferentes:

- (1) O calor de condução é conduzido através de materiais sólidos ou líquidos.
- (2) Transmissão por convecção de calor por meio de movimento em líquidos ou gases.
- (3) Transmissão de calor por radiação para dentro ou para fora de um material por meio de ondas eletromagnéticas.

A capacidade de isolamento térmico de um material é descrita pela sua *condutividade térmica*, λ . É definida como a quantidade de calor (Wh) que passa por uma camada de 1m de espessura com uma superfície de 1 m² durante 1 hora (h) quando a diferença de temperatura através do material é de 1 °C, como mostra a Figura 27.

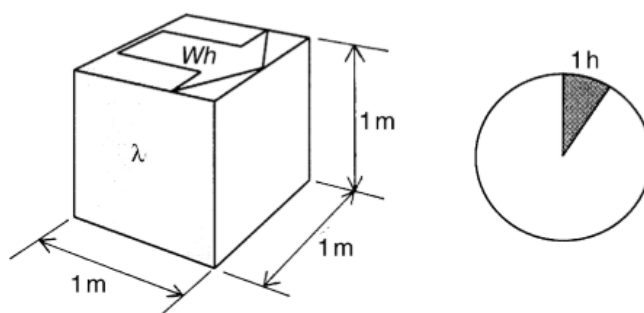


Figura 27 – Condutividade térmica λ [27].

A condutividade térmica é expressa pela equação (16).

$$\lambda = \frac{W \times h \times m}{h \times m^2 \times ^\circ C} = W/m \text{ } ^\circ C \quad (16)$$

Quanto menor for o valor de λ de um material, melhor é a sua capacidade de isolamento. O valor de λ é dependente da temperatura e, portanto, deve sempre ser dado como um valor numérico, que indica a temperatura média na qual foi medido.

A condutividade térmica é utilizada para o cálculo de quantidade de calor, q (W/m²), transmitida através de um material, expressa na equação (17) e demonstrada na Figura 28.

$$q = \frac{\lambda(T_1 - T_2)}{d} \quad (17)$$

Onde:

- T_1 – Temperatura superior na face [°C];
- T_2 – Temperatura inferior na face oposta [°C];
- d – Espessura do material [m].

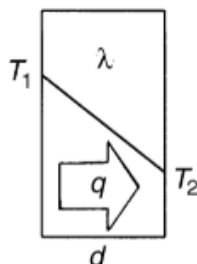


Figura 28 – Transmissão de calor através de um material [27].

A condutividade térmica de um material de isolamento não é constante durante o seu tempo de vida útil, podendo mudar como consequência da temperatura, da humidade e do próprio envelhecimento.

Para o XPS, com uma densidade a variar entre 25-40 kg/m³, apresenta uma condutividade térmica entre 0,026-0,036 W/m.°C [27].

Resistência térmica

A resistência térmica define as propriedades do isolamento térmico de um produto ou de uma estrutura. O método de cálculo aqui descrito está de acordo com a norma EN ISO 6946. A resistência térmica é denominada por R e é expressa na equação (18) em m².°C/W.

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (18)$$

Na transição entre o ar e uma superfície da parede, há também uma resistência térmica chamada resistência superficial térmica. R_{si} é a resistência superficial interior e R_{se} a resistência superficial exterior [27]. A resistência térmica traduz o efeito da convecção e da radiação e o seu valor varia em função de diversos fatores, tais como a rugosidade da superfície, a posição da superfície, entre outras [65].

Coeficiente de transmissão térmica

O Coeficiente de transmissão térmica de um elemento, de faces planas e paralelas, representa a quantidade de calor que o atravessa perpendicularmente, por unidade de tempo e superfície, quando sujeito a um gradiente de temperatura unitário entre os ambientes que separa, sendo obtido pela equação (19).

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_j R_j + R_{ar} + R_{se}} \quad (19)$$

Onde:

- U – coeficiente de transmissão térmica [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$];
- R_j – Resistência térmica da camada j [$m^2 \cdot ^\circ C/W$];
- R_{si} – Resistência térmica superficial interior [$m^2 \cdot ^\circ C/W$];
- R_{se} – Resistência térmica superficial exterior [$m^2 \cdot ^\circ C/W$];
- R_{ar} – Resistência térmica de espaços de ar [$m^2 \cdot ^\circ C/W$].

De acordo com o Decreto-Lei n.º 80/2006, o cálculo do coeficiente de transmissão térmica é realizado com recurso às tabelas de Informação Técnica de Edifícios (ITE 50), do LNEC. A resistência térmica de uma camada homogénea R_j ($W/m^2 \cdot ^\circ C$) pode ser obtida pela equação (20):

$$R_j = \frac{e_j}{\lambda_j} \quad (20)$$

Em que:

- e_j - espessura da camada homogénea j [m];
- λ_j – coeficiente de condutibilidade térmica da camada homogénea j [$W/(m \cdot ^\circ C)$].

O valor da resistência superficial exterior toma o valor da resistência superficial interior de $0,13 W/m^2 \cdot ^\circ C$ por se assumir que ambas as faces encontram-se num espaço interior útil [70]. A resistência térmica de espaços de ar assume valor zero, pelo simples facto de não existir espaço entre os materiais dos painéis sandwich.

Na Tabela 27 são apresentados os valores correspondentes da condutibilidade térmica para cada tipo de painel, resistência térmica por cada camada e respetivo coeficiente de transmissão térmica.

Tabela 27 – Valores de condutibilidade térmica e resistência térmica para cada material, e coeficiente de transmissão térmica para cada painel.

Painel	XPS	MDF	MGO	OSB	PGC	PMC
Norma	EN 12667	EN 13986:2004	BS EN 594	DIN 52612	EN ISO 10456:2007	EN 12664
λ (W/m.°C)	0,035	0,10	0,307	0,12	0,21	0,22
R_j (W/m².°C)	2,86	0,10	0,033	0,083	0,048	0,045
U (W/m².°C)	0,32	0,301	0,314	0,305	0,311	0,312

Comparando os resultados obtidos do coeficiente de transmissão térmica, concluiu-se que o painel sandwich com núcleo em XPS e lâminas em MDF apresenta uma capacidade de isolamento térmico superior aos restantes painéis. É necessário salientar que os materiais de acabamento, como a pintura, não foram contabilizados. Mas se o acabamento for universal e compatível para todas as lâminas esta comparação permanece válida.

Inércia térmica

A inércia térmica de um edifício (I_t) define a sua maior ou menor capacidade de amortecer (ϕ) e desfazar (μ) no tempo as variações de temperatura interior face à variação da temperatura no exterior. É vantajoso que os edifícios apresentem uma forte inércia, o que se consegue com o aumento da massa dos elementos de construção que estão pelo interior da camada de isolamento térmico. A capacidade de um edifício para armazenar calor depende da massa superficial útil (M_i) de cada um dos elementos de construção que o constituem, que é função da localização no edifício (elemento da envolvente, elemento interior, etc.) e da sua constituição, nomeadamente do posicionamento de eventuais camadas de isolamento térmico e das características do revestimento exterior. O RCCTE define três classes de inércia térmica definidas na Tabela 28.

Tabela 28 – Classes de inércia para edifícios definidas pelo RCCTE.

Classe de inércia	I_t [kg/m²]
Fraca	$I_t < 150$
Média	$150 \leq I_t \leq 400$
Forte	$I_t > 400$

É desejável projetar os edifícios com inércia forte, o que exige uma massa significativa dos panos interiores de parede e das divisórias. Contudo, a sua importância não é a mesma para todo o tipo de edifícios, nem para todos os tipos de clima. No verão (estação quente) a inércia dos edifícios é sempre vantajosa. No inverno (estação fria) a inércia é um fator importante nos edifícios com aquecimento contínuo. Em edifícios com aquecimento intermitente essa importância é mais reduzida.

Pontes térmicas

Segundo a norma EN ISO 10211, uma ponte térmica é toda e qualquer zona da envolvente dos edifícios em que a resistência térmica é significativamente alterada. Essa alteração pode ser causada pela existência localizada de materiais de diferentes condutibilidades térmicas e/ou por uma modificação na geometria da envolvente, como é o caso das ligações entre diferentes elementos construtivos. Os impactos das pontes térmicas incluem:

- diminuição capacidade térmica;
- aumento do risco de condensações;
- a sujidade adere rapidamente a superfícies frias.

4.3.4 Comportamento à Humidade

A definição de humidade é água nas suas várias fases: vapor, líquido ou gelo. A humidade existe em toda a parte e não é perigosa como tal, exceto quando aparece nos lugares errados e em quantidades muito grandes, podendo causar danos numa variedade de formas, incluindo:

- manchas;
- corrosão;
- mofo;
- desagregação, como consequência de ciclos de gelo/degelo;
- aumento do fluxo de calor.

Os painéis sandwich, tratando-se de produtos pré-fabricados, o teor de humidade como consequência da fabricação não é considerado. A humidade na fase de construção também é mínima, uma vez que os materiais comuns do núcleo são hidrófugos e as únicas partes

abertas num painel são as extremidades. No entanto, é uma boa prática proteger as superfícies do painel durante a fase de construção, a fim de impedir completamente a penetração de humidade na estrutura.

A humidade do ar contém vapor de água e o conteúdo é expresso como o teor de vapor em g/m³. Nos cálculos técnicos, é determinada a humidade relativa, RH, e é definida como a razão entre o teor de vapor real e o teor de vapor de saturação e é geralmente expressa como uma percentagem.

A temperatura na qual o valor de vapor real é igual ao valor de vapor de saturação é denominado de ponto de orvalho. É importante que o ponto de orvalho não seja atingido dentro da habitação. O teor de humidade do ar externo varia durante o ano e com as condições climáticas. No interior, o teor de humidade é determinado pelo conteúdo de vapor ao ar livre, a geração de humidade dentro da habitação e a quantidade de ventilação, expressa na equação (21).

$$v_i = v_e + \frac{GV}{n} \quad (21)$$

Onde:

- v_i – teor de vapor no interior [g/m³];
- v_e – teor de vapor no exterior [g/m³];
- G – humidade interior gerada (g/h);
- n – número de trocas de ar por hora;
- V – volume de ar interior.

Quando a temperatura numa superfície é menor que o ponto de orvalho do ar ambiente, ocorre a condensação nessa superfície. A temperatura da superfície na qual isto ocorre pode ser calculada através da expressão (22).

$$T_s = T_i - \frac{R_{si}(T_i - T_e)}{R_{tot}} \quad (22)$$

Onde:

- R_{tot} – Resistência térmica total da parede [m².°C/W];
- R_{si} – Resistência superficial [m².°C/W];
- T_i – Temperatura do ar no interior [°C];
- T_e – Temperatura do ar no exterior [°C];

- T_s – Temperatura superficial [°C].

Nos cálculos de condensação, a resistência de transição R_{si} tem uma influência considerável na temperatura da superfície. Nos cantos, a resistência de transição é maior do que no centro de uma parede. Em regra geral, estando no lado da segurança, é comum usar $R_{si}=0,5\text{m}^2\text{C}/\text{W}$ nestes cálculos. Em muitos casos, a condensação superficial é de natureza local, como por exemplo em locais com isolamento insuficiente, estruturas não apertadas, pontes ou cantos térmicos ou onde o material tenha sido armazenado contra uma parede, criando resistência térmica adicional e, portanto, reduzindo a temperatura da superfície. Em ambientes internos normais e com espessuras de isolamento atuais, geralmente não há nenhum problema nas habitações onde painéis sandwich são usados. Estes criam um isolamento homogêneo sem pontes térmicas. É provável que quaisquer pontos críticos estejam localizados nas fixações e detalhes mal projetados, criando pontes térmicas. Para ambientes húmidos deve ser efetuado um cálculo detalhado da humidade e a construção deve ser projetada de acordo com este estudo [27].

No caso da resistência ao vapor de água e à resistência à humidade, devem ser apresentados os valores de acordo com a norma EN 12524. O teste à resistência ao vapor de água do isolamento térmico existente deve ser feito consoante a norma EN 12086 ou se se tratar de um novo material, deve estar de acordo com a norma EN ISO 12572.

O comportamento à humidade foi considerado nesta dissertação em termos gerais, não tendo sido feito um estudo mais aprofundado.

4.3.5 Durabilidade a longo prazo

Os painéis sandwich devem manter uma série de propriedades ao longo da sua vida útil, nomeadamente propriedades resistentes, isolantes e acabamento das superfícies. Os requisitos de durabilidade são, contudo, complexos e variam com fatores como o tipo de aplicação dos painéis e os seus materiais constituintes. Existem diversas ações que podem causar a degradação dos painéis. São de referir os carregamentos prolongados (peso próprio), as variações de temperatura, a humidade e até mesmo certos impactos. Estas ações podem causar aumentos de deformação, perda de capacidade resistente e degradação das propriedades dos materiais. As variações de temperatura e de humidade podem originar

condensações nas faces interiores das lâminas (podendo causar corrosão interna ou perda de aderência entre o núcleo e as lâminas), degradação do material de núcleo e/ou perda de propriedades isolantes. A escolha dos materiais é, por conseguinte, uma matéria importante no que respeita à durabilidade dos painéis sandwich. A durabilidade do material adesivo é importante para garantir uma boa aderência entre as lâminas e o núcleo e, assim, a sua resistência [27].

A durabilidade a longo prazo dos painéis sandwich não foi objeto de estudo no presente trabalho. No entanto, é uma propriedade bastante importante e que deverá ser tida em conta em trabalhos futuros.

4.3.6 Ensaios Normalizados a Painéis Sandwich

Segundo a norma ABNT NBR 15575-4, os painéis sandwich estão sujeitos aos ensaios de:

- Verificação da permeabilidade à água
- Determinação da resistência dos sistemas de vedação verticais internas, sem função estrutural, às solicitações de peças suspensas
- Verificação da resistência a impactos de corpo duro nos sistemas de vedação verticais internas, sem função estrutural

De acordo com a norma EN 789 (ensaio à flexão em quatro pontos), ver Figura 29, a característica da rigidez de flexão, BS (bending strength) em N/mm² é calculada através da equação (23)

$$BS = \frac{3F_{\max}l_2}{bt^2} \quad (23)$$

Onde, F_{\max} é a máxima força aplicada, l_2 é 16 vezes a espessura (mm), b é a largura da amostra de teste (mm), t é a espessura da amostra de teste (mm).

O módulo de elasticidade é calculado através da equação (24).

$$ME = \frac{3(F_2 - F_1)l_1^2 l_2}{4bt^3(U_2 - U_1)} \quad (24)$$

Onde, F_1 corresponde aproximadamente a 10% e F_2 corresponde aproximadamente 40% da força máxima aplicada F_{\max} e $(U_2 - U_1)$ é o incremento da deformada correspondente a $(F_2 - F_1)$ na curva de carregamento-deformada.

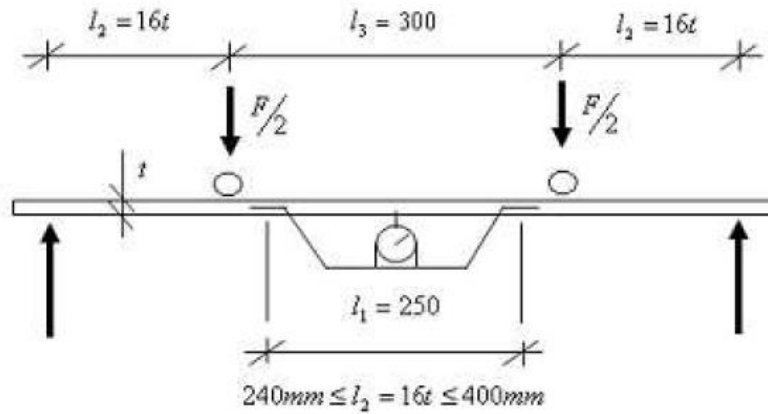


Figura 29 – Configuração do aparelho de teste à flexão pela norma EN 789. Adaptado [71].

De acordo com a norma EN 310 (ensaio à flexão em três pontos), ver Figura 30, a característica da rigidez de flexão, BS (bending strength) em N/mm² é calculada através da equação (25).

$$BS = \frac{3F_{\max}l_1}{2bt^2} \quad (25)$$

Onde, F_{\max} é a máxima força aplicada, l_1 é a distância entre os dois suportes (mm), b é a largura da amostra de teste (mm), t é a espessura da amostra de teste (mm).

O módulo de elasticidade é calculado através da equação (26).

$$ME = \frac{(F_2 - F_1)l_1^3}{4bt^3(U_2 - U_1)} \quad (26)$$

Onde, F_1 corresponde aproximadamente a 10% e F_2 corresponde aproximadamente 40% da força máxima aplicada F_{\max} e $(U_2 - U_1)$ é o incremento da deformada correspondente a $(F_2 - F_1)$ na curva de carregamento-deformada.

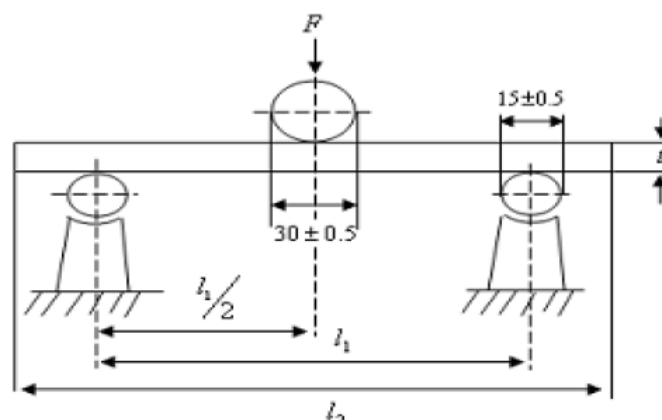


Figura 30 – Configuração do aparelho de teste à flexão pela norma EN 310. Adaptado [71].

Um estudo realizado por S.F. Tsen e M. Zamin Jumaat [71], comparou a rigidez de flexão e a média do módulo de elasticidade através das normas EN310 e EN789 em painéis de madeira. Os painéis sujeitos à norma EN310 apresentaram uma rigidez de flexão maior e a média do módulo de elasticidade menor que a norma EN789. E além da dependência destas duas características para a localização do ponto de avaliação, de apoio e de carga, concluiu-se que as diferentes espécies de madeira testadas poderiam influenciar a rigidez de flexão, média do módulo de elasticidade e a correlação entre EN310 e EN789.

De acordo com ETAG 019, uma ETA é um de dois tipos de especificações técnicas no sentido da Diretiva de Produtos de Construção EC 89/106. A ETAG é uma base para a ETA, o que significa que é uma base para uma avaliação técnica.

Para os painéis de face ou pele com base em madeira, como é o caso do OSB, MDF e PMC, a ETAG 019 (Guideline for European Technical Approval) recomenda valores limite para a construção destes painéis. Segundo esta guia, o cálculo das tensões destes painéis deve ser calculado segundo a norma EN 1995-1-1 e o guia para a construção assistida por testes são dados na clausula 3.2 do Apêndice D da parte 1 do Euro código 1 (EN 1991-1).

4.4 Análise estrutural

Neste subcapítulo pretende-se mostrar o comportamento estrutural dos painéis sandwich submetidos a vários tipos de carga, valores já apresentados anteriormente. A análise que vai ser exposta é de certa maneira similar há que foi proposta apenas para o painel de XPS, aplicando a mesma intensidade das cargas.

De maneira a desenvolver tal estudo, foi necessário estabelecer as propriedades mecânicas de cada material que servirá de face para o painel sandwich. Estas características foram obtidas através de ensaios normativos como mostra a Tabela 29. Para os painéis MDF, MGO, OSB e PMC as suas características são estabelecidas segundo as normas EN 310, EN 319, EN 310 e EN 321, respetivamente. Para o painel PGC as suas características são estabelecidas através da norma EN 520:2004+A1:2009.

Tabela 29 – Propriedades mecânicas (N/mm²) para cada tipo de painel de face e respetiva norma.

Características	MDF	MGO	OSB	PMC	PGC
Resistência à Flexão	26-30	12,4-17,7	26	9	4,6
Resistência à Tração	0,75-0,80	2,32	13	0,5	1,9
Módulo de Elasticidade em Flexão	2500	6503	4600	4500	3800
Resistência à Tração após Ensaio Cíclico	0,25	-	0,15	-	-

A análise estrutural necessária para prever as tensões e as deformações nos painéis é essencialmente feita através da teoria das vigas com adição da deformação por esforço transversal [27].

Davies [27], estabeleceu para dois tipos de carga, que serão descritos em seguida, aplicadas nos painéis sandwich em que se deve ter em conta a interação entre os elementos, faces e núcleo, dos mesmos. A rigidez de flexão, B_S , de um painel sandwich é obtida através da equação (27).

$$B_S = \frac{E_{F1} A_{F1} E_{F2} A_{F2}}{E_{F1} A_{F1} + E_{F2} A_{F2}} e^2 \equiv B_S = \frac{E_F A_F}{2} e^2 \quad (27)$$

Onde:

- A_{F1} , A_{F2} – área da secção de corte das faces [m²];
- E_{F1} , E_{F2} – módulo de elasticidade das faces [MPa];
- d_C – espessura do núcleo [m];
- G_C – módulo de cisalhamento do núcleo.

A Figura 31 mostra as dimensões usadas na aplicação da equação (27) numa pequena parte de um painel sandwich com lâminas finas.

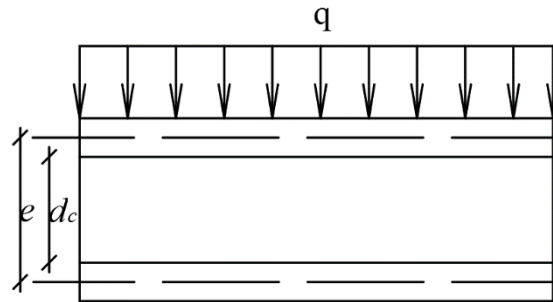


Figura 31 – Dimensões de um tipo de painel sandwich com lâminas finas. Adaptado [27].

Para um painel simplesmente apoiado com uma carga linear distribuída uniformemente (Figura 32), a tensão máxima $\sigma_{F,max}$ (MPa) e o momento máximo M_{max} (kNm) são obtidos a meio vão, onde $\xi=0.5$, calculados através das equações (28) e (29), respetivamente.

$$\sigma_{F,max} = \pm \frac{qL^2}{8 e A_F} \quad (28)$$

$$M_{max} = \frac{q L^2}{8} \quad (29)$$

A deformação para este tipo de carga é obtida através da equação (30).

$$w = \frac{q L^4}{24 B_S} \xi (1 - \xi) (1 + 4k + \xi - \xi^2) \quad (30)$$

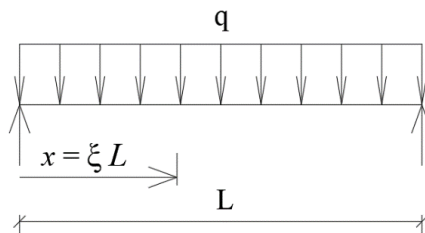


Figura 32 – Painel sandwich simplesmente apoiado com uma carga linear distribuída uniformemente.

Como a deformação máxima $w_{máx}$ (m) é a meio vão, obtém-se a equação (31).

$$w_{máx} = \frac{5qL^4}{384B_S} (1+3,2k) \quad (31)$$

Onde k é obtido através da equação (32).

$$k = \frac{3 B_S}{A_C G_{\text{eff}} L^2} \quad (32)$$

Onde:

- $A_C = b \times e$ – área efetiva [m²];
- $G_{\text{eff}} = \frac{G_C \times e}{d_C}$ – módulo de *cisalhamento* efetivo do núcleo [MPa].

Para um painel sandwich em que é aplicada uma carga pontual P no meio do vão (Figura 33), a tensão máxima (MPa) e o momento máximo (kNm) são obtidos pelas equações (33) e (34), respetivamente.

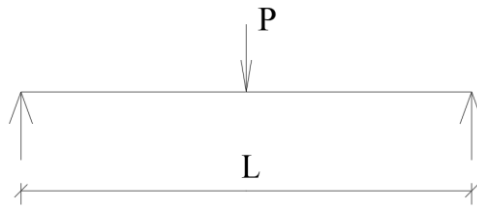


Figura 33 – Pannel sandwich simplesmente apoiado com uma carga pontual aplicada a meio vão.

$$\sigma_{F.\text{max}} = \pm \frac{PL}{4 e A_F} \quad (33)$$

$$M_{\text{max}} = \frac{PL}{4} \quad (34)$$

A deformação máxima para este tipo de carga é obtida através da equação (35).

$$w_{\text{max}} = \frac{P L^3}{48 B_S} (1 + 4k) \quad (35)$$

Onde k é calculado através da equação (32).

No subcapítulo 2.2.3 foi definido o limite da deformação aceitável para uma parede de divisória como $L/500 = 6$ mm. Este valor é considerado novamente como limitante para a análise dos painéis sandwich.

Na Tabela 30 encontram-se os resultados obtidos, realizados através de uma folha de cálculo em excel, para as deformações dos painéis sandwich submetidos a uma carga linear distribuída em todo o vão, a 1,20 m a partir do solo e uma carga pontual aplicada a meio vão.

Os resultados das reações nos apoios para cada caso de carga são iguais aos apresentados desde a Tabela 10 até à Tabela 13. É importante salientar que o valor atribuído para o módulo de rigidez do núcleo foi $G_c=15,0$ MPa, porque na análise feita através do SAP2000, apresentada de seguida, considerou-se o coeficiente de Poisson igual a zero.

Analisando os resultados obtidos e comparando com o limite de deformação imposto, conclui-se que aplicação de materiais em ambas as faces do XPS satisfaz este critério. Independentemente do tipo de material ou tipo de carga esta condição é satisfeita.

O material que tem melhor comportamento, apresenta deformações mais reduzidas, em conjunto com o XPS é o MGO. Sendo que esta conclusão não se encontra completa, por não ter sido feita a análise do momento aplicado a meio vão (mão-francesa) nem a carga linear uniformemente distribuída até 1,20 m do solo.

De maneira a completar esta análise e poder comparar com os resultados obtidos, modulou-se o painel sandwich em SAP2000. As propriedades do núcleo são iguais às da Tabela 9, assim como a disposição do painel e o tipo de apoios são idênticos à análise feita em SAP2000 para o XPS. Na Tabela 31 encontram-se os resultados das deformações (em m) para cada tipo painel sandwich e com a respetiva carga aplicada.

Tabela 30 – Resultados obtidos para a deformação pela aplicação das equações segundo Davies (2001).

Faces	MDF	MGO	OSB	PMC	PGC
B _s	151,25	393,4	278,3	272,85	229,9
k	0,03	0,07	0,05	0,05	0,04
w (carga pontual) [m]	0,002	0,0009	0,0012	0,0012	0,0014
w (carga distribuída) [m]	0,0037	0,0017	0,0022	0,0022	0,0026

Na Figura 34 é possível visualizar o topo do painel sandwich modelado em SAP2000 onde é perceptível a ligação entre o núcleo em XPS (cinzento claro) e as duas lâminas (cinzento escuro) através de elementos área, ligados entre si através dos nós.

Tabela 31 – Resultados das deformações (m) obtidas em cada painel sandwich para cada tipo de aplicação de carga em SAP2000.

Tipo de aplicação da carga	MDF	MGO	OSB	PMC	PGC
Pontual	0,002	0,001	0,0013	0,0012	0,0014
Distribuída	0,0038	0,0018	0,0025	0,0022	0,0026
Distribuída a 1,20 m do solo	0,0013	0,0007	0,0009	0,0008	0,0009
Mão-francesa padrão	0,0002	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001

As deformações obtidas pela aplicação do momento a meio vão dos painéis sandwich é quase nula. Para os restantes casos de aplicação de carga nos painéis, comparando a Tabela 30 com a Tabela 31, os valores das deformações são aproximadamente idênticos.

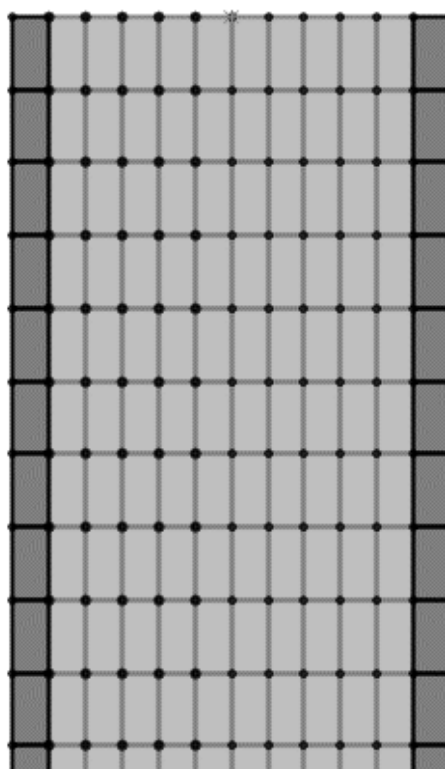


Figura 34 – Topo do painel sandwich modelado em SAP2000.

Através desta análise conclui-se que, utilizando o MGO como face do painel sandwich com núcleo em XPS é o material que apresenta melhor comportamento estrutural, menor

deformação. Portanto, a solução que apresenta melhor comportamento estrutural é usando o painel MGO como face do painel sandwich com núcleo em XPS. Os resultados das deformações para cada painel sandwich podem ser observados em Anexos.

5 Solução Final e Realização de protótipos

Neste capítulo são apresentados colas e materiais de acabamento para os diferentes painéis sandwich e os protótipos do painel sandwich com função de parede divisória interior. Foram desenvolvidos em laboratório e têm como objetivo mostrar detalhes construtivos que são apresentados nos subcapítulos seguintes. O material utilizado como núcleo foi o XPS, com 100 mm de espessura e para as lâminas foram utilizados painéis OSB, com 9 mm de espessura. É apresentado um estudo económico para o preço do painel por cada m² e é comparado com soluções existentes.

5.1 Execução dos painéis sandwich

Neste subcapítulo, são apresentados alguns exemplos de colas que se utilizam na colagem das faces ao núcleo dos painéis sandwich. É necessário salientar que, além da seleção da cola estar predominantemente definida pelo tipo de material do núcleo, neste caso o XPS, a escolha do tipo de cola também tem de estar de acordo com as características do material de face. Atualmente, existe no mercado uma série de colas que podem ser utilizadas, mas como já foi dito, é necessário ter em atenção a compatibilidade dos materiais.

Existe um selante adesivo universal com propriedades de cola e vedação, livre de solventes e silício, que apresenta uma taxa de encolhimento reduzida, pode ser pintado e é resistente à água. Tal como ao aço galvanizado, este material pode ser aplicado a qualquer umas das lâminas apresentadas na presente dissertação, segundo ETAG 022 [72]. Esta norma aplica-se a revestimentos líquidos, com ou sem superfícies de desgaste, que tornam estanques pisos e paredes sujeitas à humidade [73].

Com intenção de não ser apenas apresentado um caso universal de cola para painéis, será apresentado de seguida um tipo de cola específico, neste caso, aplicado a painéis OSB. A colagem dos painéis OSB exige um grau de humidade específico consoante o tipo de painel e as suas especificações do fabricante. A colagem deve ser feita em condições limpas e secas, isentos de quaisquer manchas gordurosas e com um grau de humidade inferior a 15%. As colas de utilização mais frequente são as seguintes [56]:

- resorcinas e ureia-formaldeído para o madeiramento e ambientes húmidos;
- resinas vinílicas para trabalhos correntes em espaços interiores;

- poliuretanos para colagens especiais;
- neoprenes para colagens por contacto (revestimento).

5.2 Materiais para montagem dos painéis sandwich e acabamento das juntas

Neste subcapítulo serão apresentados materiais vedantes e de acabamento adequados para painéis sandwich, em que a sua utilização é aplicável na fase em que os painéis já se encontram colocados in situ. Nesta fase, os painéis apresentam entre eles juntas e arestas vivas que precisam de ser vedadas e tornarem-se estanques.

O sistema de colagem é em geral composto por um adesivo (mastique de poliuretano), uma fita adesiva de dupla face e um conjunto de primários para serem aplicados sobre a estrutura e sobre o painel de forma a promover a aderência. O fabricante do sistema deverá ser sempre consultado, de forma a respeitar todos os condicionantes e especificações técnicas. As juntas entre painéis devem ser sempre assumidas, com uma abertura mínima de 5 mm podendo ser ou não preenchidas. No caso de serem preenchidas, deve ser utilizado um mastique elastómero de 1ª categoria de poliuretano ou polímero híbrido. Para melhorar a aderência do mastique devera ser aplicado um primário sobre o painel [44].

No caso dos painéis MGO, o tipo de fita a usar para cobrir as juntas é uma fita de malha quadrada, 100 % polyester, fina e elástica [74]. A esta fita é necessário juntar uma pasta especial à base de água, própria para este tipo de painéis [75]. Há adesivos acrílicos que podem também ser usados em conjunto com os fixadores [76].

No caso dos painéis PGC, na Tabela 32 são apresentados dois tipos de fitas, para juntas e para arestas vivas.

A norma EN 13279-1:2008 refere-se às definições e requisitos do gesso e produtos com base em gesso. A norma EN 14353:2007+A1:2010 refere-se às definições, requisitos e métodos de ensaio de cantoneiras e perfis metálicos para utilização em placas de gesso [78]. Há disponível no mercado, pasta de juntas de secagem rápida para sistemas de placas de gesso laminado do tipo H1 e H2, de fácil hidratação e excelente consistência [79].

Tabela 32 – Fitas para tratamento de juntas e arestas vivas em painéis sandwich com faces em PGC. Adaptado [77].

Fitas	Descrição	Aplicação	Largura	Norma
Juntas	Fita de papel kraft com tratamento impermeabilizante, microperfurado	Tratamento de juntas de painéis PGC	5,1 cm	EN 13963
Arestas Vivas	Fita de papel kraft com tratamento impermeabilizante, microperfurado. Com duas lâminas de aço galvanizado	Para proteger as arestas vivas dos painéis PGC	5,1 cm	EN 14353

No caso dos painéis OSB, estes podem ser maquinados, furados, moldados e cortados com as ferramentas de utilização comum em trabalhos de madeira. Podem receber acabamentos ou revestimentos plásticos espessos (após aplicação de uma camada de aderência). Previamente a qualquer uma destas operações, a superfície do painel deverá ser ligeiramente lixada para evitar o risco de eventuais rejeições. Em qualquer das alternativas, recomenda-se a consulta das informações técnicas do fabricante do produto utilizado. Os produtos aplicáveis no OSB são [56]:

- imunizadores – produtos que não formam película e garantem a proteção por impregnação da superfície tratada e contêm fungicidas e inseticidas;
- vernizes – a superfície do painel deve ser ligeiramente lixada de modo a eliminar todos os resíduos de cola e garantir, assim, uma aderência uniforme do verniz;
- produtos ignífugos – vernizes intumescentes que proporcionam uma proteção eficaz das madeiras e painéis.

Para as juntas do painel OSB, a argamassa que é colocada para revestir o painel é colocada na junta e serve de suporte a uma fita de fibra de vidro [80].

Para os painéis MDF e PMC, o tipo de materiais a utilizar nas juntas encontram-se descritos na Tabela 33. Estes materiais também podem ser aplicados nas juntas entre painéis de gesso cartonado e OSB.

Tabela 33 – Produtos de enchimento de juntas para painéis sandwich. Adaptado [81] e [82].

Material	Descrição	Aplicação	Características
Mastique de poliuretano multiusos	Monocomponente à base de poliuretano, que cura em contacto com a humidade, para selagens e colagens elásticas.	Selagem de juntas verticais e horizontais, selagem de emendas em construções metálicas e de madeira.	Isento de silicone Muito boa aderência à maior parte dos materiais construtivos Boa resistência à exposição ambiental e ao envelhecimento
		Cola elástica multiusos para elementos pré-fabricados.	Absorve vibrações e ruídos de impacto Muito baixas emissões
Mastique acrílico	Monocomponente baseado numa dispersão acrílica. É tixotrópico e está especialmente concebido para a selagem de juntas em interiores e fissuras com baixa amplitude de movimentos.	Selagem em interiores de juntas de ligação com pouco movimento em bases como fibrocimento, placas de gesso, madeira, etc.	Baixo odor Fácil de aplicar Boa aderência Permite movimentos até 10% da largura da junta Elevada durabilidade

Ao fim do painel estar devidamente selado, este encontra-se pronto para receber o acabamento final. Este acabamento pode ser feito através de pintura ou da aplicação de revestimento cerâmico, dependendo do que é pretendido. No caso da pintura, é desejável que esta seja hidrófuga, resistente às lavagens frequentes e previna o crescimento de fungos e outros micro-organismos. Antes de aplicar tinta sobre os painéis, as superfícies devem estar totalmente limpas e secas, sem gorduras, pó ou sais superficiais. A limpeza das superfícies deve ser realizada através de um polimento com disco de limpeza ou em alternativa por polimento superficial com lixa muito fina. A pintura deverá ser sempre aplicada sobre um primário que estabiliza a superfície e que funciona como um tapa poros, proporcionando aderência e compatibilidade da tinta a superfície do painel [44].

5.3 Ligação entre painéis

O protótipo 1, foi idealizado com a finalidade de se compreender como é que o encaixe entre painéis seria concretizado e se seria necessário formar dois chanfros numa das extremidades. Inicialmente, foi decidido que o encaixe seria macho-fêmea e que as juntas seriam desfasadas, ver Figura 37 b). O motivo pelo qual se definiu este desfasamento entre juntas foi com o objetivo de criar uma superfície de corte maior quando comparada com juntas paralelas entre os painéis de OSB.

Posto isto, procedeu-se ao corte das placas de XPS e OSB com 250 mm e 275 mm de altura, respetivamente. As placas foram cortadas por diferentes máquinas de corte, para o XPS foi utilizada a máquina de corte para pedra e para o OSB, uma máquina de corte para madeiras. As respetivas medidas são apresentadas na Figura 35, que permite visualizar a vista em planta das peças.

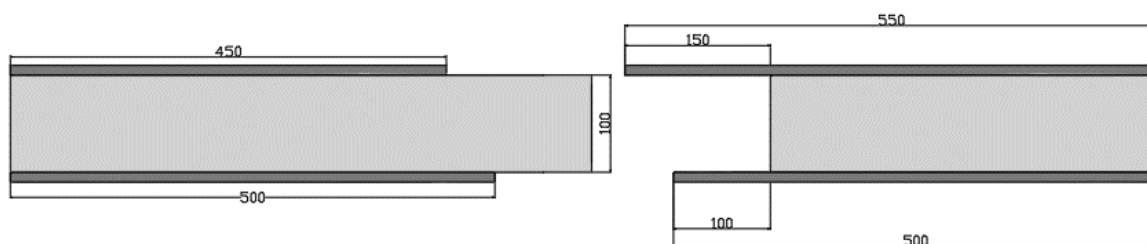


Figura 35 – Vista em planta do protótipo 1 (fase inicial).

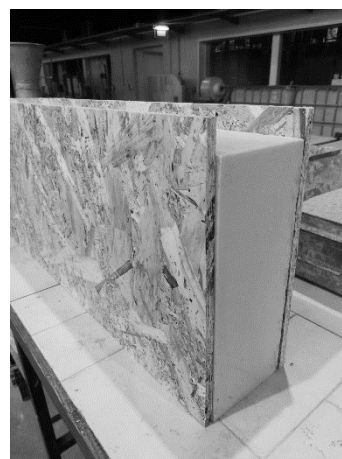
Depois de cortadas, as mesmas foram coladas, com cola silicone, uma a uma com um intervalo de tempo de 24 horas entre cada lâmina, garantindo assim que ficassem corretamente ligadas, ver Figura 36 a). Durante este intervalo de tempo, foram aplicados cubos de betão por forma a simular uma prensa, ajudando assim na colagem (Figura 36 b)). Depois de coladas ambas as lâminas ao núcleo, o protótipo ficou com o aspeto final que se encontra na Figura 36 c).



a) Colagem do núcleo
a uma lâmina



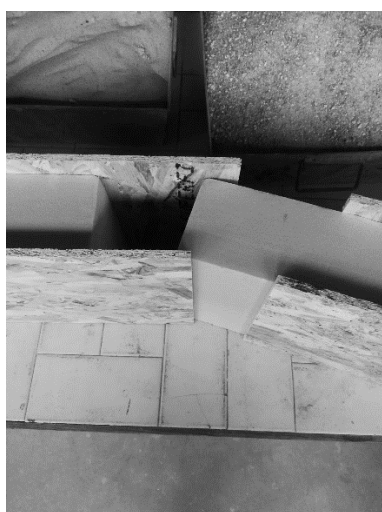
b) Prensagem de uma
lâmina ao núcleo



c) Aspeto final do
protótipo 1

Figura 36 – Fases de colagem dos revestimentos ao núcleo e aspeto final do protótipo 1.

As próximas figuras mostram as três tentativas que foram realizadas para compreender qual seria a melhor forma de encaixe entre os painéis. Na Figura 37 a) e b) é possível visualizar o encaixe lateral entre os painéis do protótipo 1 sem qualquer corte na saliência do XPS.



a) Tentativa de encaixe sem chanfros



b) Painéis encaixados sem chanfros

Figura 37 – Pormenores de encaixe lateral entre painéis sem chanfro.

Na Figura 38 a) e b) é possível visualizar que foi realizado um chanfro numa das faces do XPS com intenção de facilitar o encaixe dos painéis.



a) Tentativa de encaixe com um chanfro



b) Painéis encaixados com um chanfro

Figura 38 – Pormenores de encaixe lateral entre painéis com um chanfro.

Na Figura 39 a) e b) é possível visualizar que, depois de feito um chanfro, procedeu-se a realização de outro chanfro na face oposta.



a) Tentativa de encaixe com dois chanfros



b) Painéis encaixados com dois chanfros

Figura 39 – Pormenores de encaixe lateral entre painéis com dois chanfros.

Comparando estas três soluções, conclui-se que o corte das duas faces da saliência do XPS facilita a sua entrada na extremidade do outro painel. Define-se, portanto, que o encaixe

lateral entre os painéis sandwich é feito com dois chanfros na saliência do núcleo em XPS e que as juntas ficam desfasadas. Na Figura 40 são apresentadas as medidas finais assumidas para o protótipo 1. Definiu-se 50 mm como o comprimento mínimo de contacto entre o núcleo e as lâminas de revestimento.

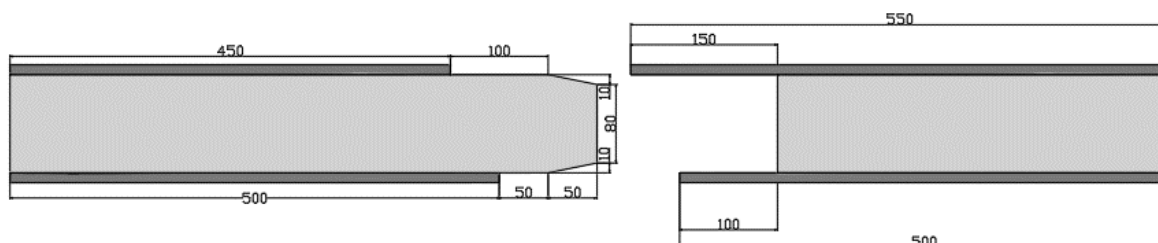


Figura 40 – Vista em planta do sistema de encaixe macho-fêmea do protótipo 1 (fase final).

Na Figura 41 e Figura 42 são apresentadas soluções de uma ligação em T e uma ligação de canto dos painéis sandwich, respetivamente. O seu desenvolvimento é feito em fábrica e a união entre os materiais é realizada através de colagem entre o núcleo e as lâminas, e cantoneiras aparafusadas pelo interior nas lâminas.

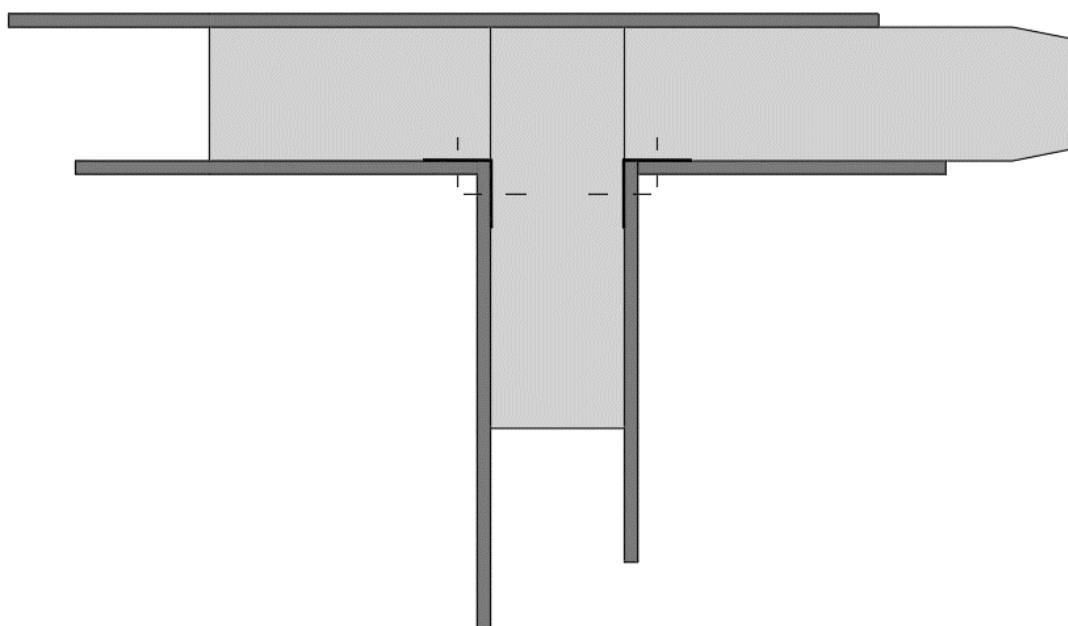


Figura 41 – Vista em planta de ligação em T dos painéis sandwich.

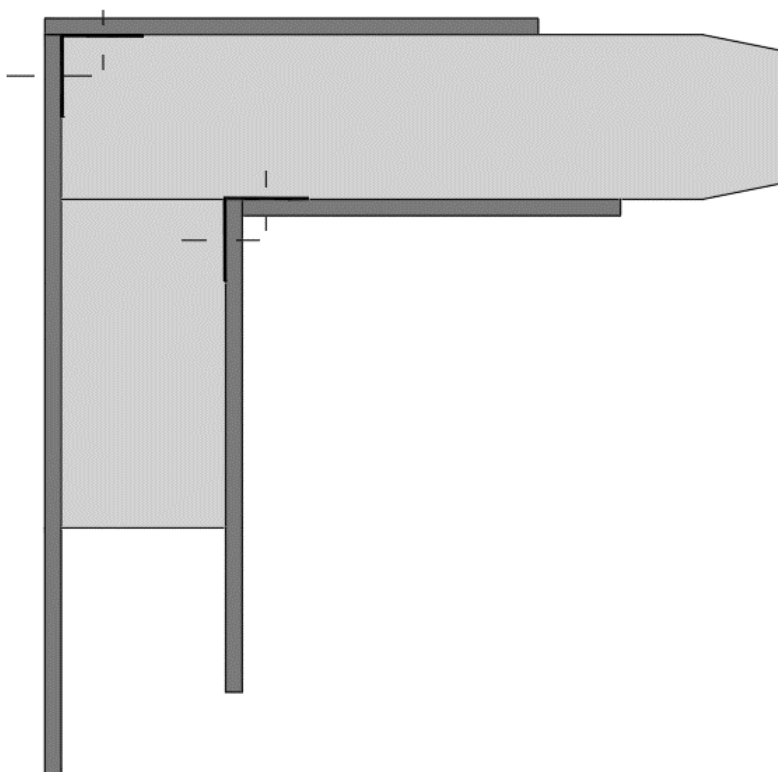


Figura 42 – Vista em planta de ligação de canto dos painéis sandwich.

Há inúmeras combinações para cada uma destas duas ligações visto que a ligação é feita através de macho-fêmea. No caso da ligação em T, devem ser colocados três perfis de suporte. Enquanto que na ligação de canto só devem estar presentes dois perfis. O número de perfis está relacionado com o número de painéis que são unidos.

5.4 Ligação dos painéis sandwich ao piso

A construção do protótipo 2 tem como objetivo mostrar a aplicação dos perfis em “U” no painel sandwich. Numa primeira fase, manuseou-se o perfil em “U”, com uma largura inicial de 70 mm, por forma a criar um perfil com a mesma largura do núcleo, 100 mm, e com uma altura de 300 mm, ver Figura 43 e Figura 44. Para isto procedeu-se a realização de corte e dobragem do mesmo. Colocaram-se dois perfis no XPS, à distância pretendida como se pode observar na Figura 44 e pressionou-se por forma a ficar embutido até 150 mm (Figura 45 a)). Depois nos cantos do perfil foram colocados rebites (Figura 45 b)). A colocação destes perfis

tem como finalidade garantir a estabilidade do painel sandwich e ao mesmo tempo permitir a fixação do painel ao solo. A estabilidade dos perfis é garantida por simples encaixe e colagem ao núcleo e pregagem aos revestimentos. A forma dos perfis foi concebida para melhorar a rigidez do próprio elemento e impedir deslocamentos horizontais do painel.

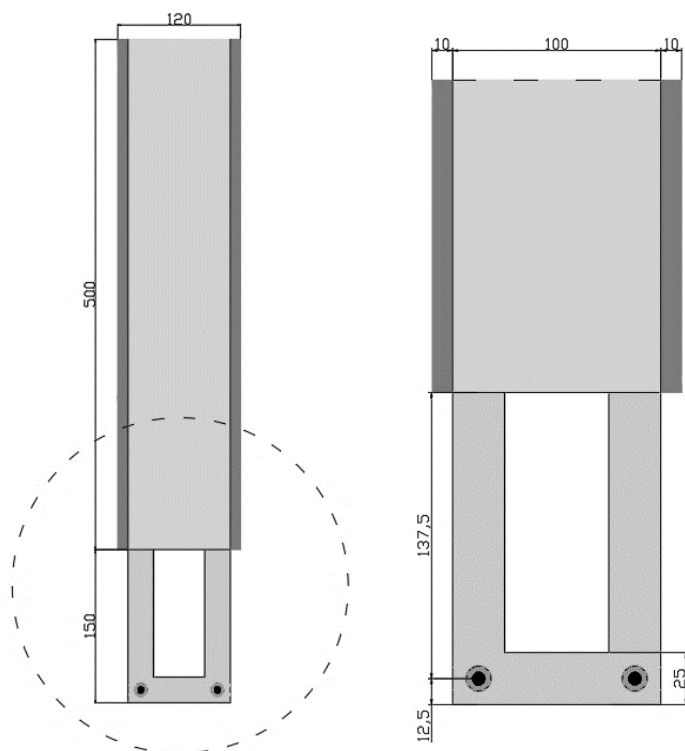


Figura 43 – Vista lateral do protótipo 2 com um pormenor e respetivas medições.

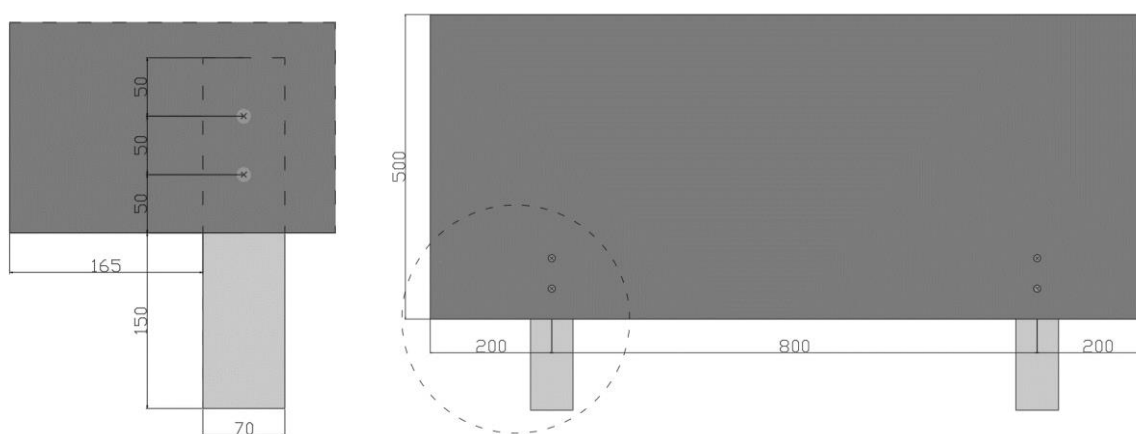
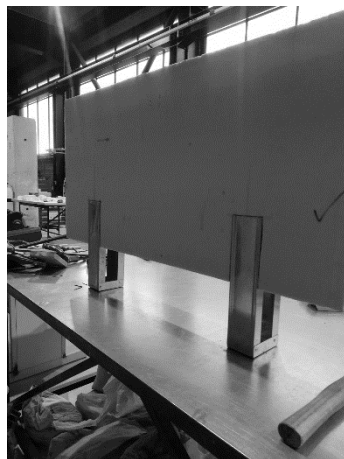


Figura 44 – Vista frontal do protótipo 2 com um pormenor e respetivas medições.

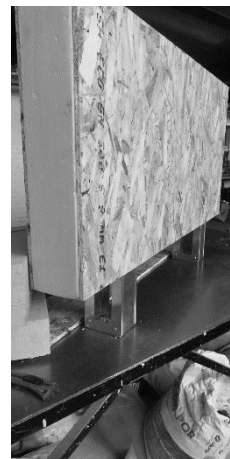
O procedimento de colagem das lâminas ao núcleo foi idêntico ao que se realizou para o protótipo 1. Na Figura 45 c) observa-se o apeto final do protótipo 2, antes da aplicação dos parafusos.



a) Prensagem dos perfis ao núcleo



b) Perfis aplicados no núcleo



c) Aspeto final do protótipo 2 (sem parafusos)

Figura 45 – Aplicação dos perfis no núcleo e aspeto final do protótipo 2 (sem parafusos).

Para assegurar a ligação dos perfis ao painel, o sistema inclui dois acessórios de fixação por cada perfil, parafusos com a cabeça trombeta e ponta broca. Portanto, por cada perfil foram colocados quatro parafusos, dois em cada lâmina segundo a direção do comprimento do painel sandwich, distanciados em 50 mm (Figura 46 b)). Estes parafusos fazem a ligação a todos os materiais de revestimento apresentados neste trabalho com o perfil metálico.



a) Situação de aparafusamento a evitar.



b) Aparafusamento correto.

Figura 46 – Situações observadas no aparafusamento das lâminas ao perfil e núcleo.

No aparafusamento é necessário ter especial atenção à força que é feita para evitar situações de esmagamento da lâmina, como se verificar na Figura 46 a), em que diminui a área de contacto entre o parafuso e a lâmina reduzindo assim a resistência da ligação.

O parafuso deve preferencialmente ter marcação CE com base numa ETA (segundo o ETAG 014), que deve incluir todas as características a seguir referidas [83]:

- Ensaios de caracterização/comportamento – Determinação da resistência ao arrancamento;
- Ensaios de identificação – Resistência à tração;
- outros ensaios definidos no ETAG 014.

Depois de desenvolvido o protótipo 2, procedeu-se à pesagem do mesmo e obteve-se um peso de 7,40 kg. Com este peso, estimou-se que o painel com 3,0 m de comprimento e com a mesma largura teria um peso de 44,40 kg. Foi realizado um ensaio de carga no protótipo 2 com um peso de 60 kg e não se verificou nenhuma deformação. Com isto, é possível definir o painel sandwich como autoportante. O painel é transportável apenas por uma pessoa, mas aconselha-se que o seu manuseamento seja feito por duas pessoas.

5.5 Instalações Técnicas

Para qualquer edificação, há obrigação de providenciar com instalações técnicas que permitem satisfazer as necessidades básicas dos seus ocupantes. Estas instalações são, essencialmente, de dois tipos, as elétricas e as hidráulicas, e para o caso dos edifícios em que são aplicados módulos interiores autoportantes, estes não diferem das instalações mais comuns de qualquer outro tipo de edifício. Neste tipo de sistema construtivo, pretende-se que estes módulos contenham furações apropriadas para a passagem deste tipo de instalações, no entanto existe a necessidade de salvaguardar alguns cuidados na colocação destas instalações, como o cuidado de proteger os orifícios nos perfis metálicos por onde passam as tubagens, a fim de prevenir ruídos de percussão, e o cuidado de no caso de fixação das tubagens diretamente à estrutura metálica, interpor sempre entre as instalações e a estrutura materiais resilientes [14].

Para as instalações hidráulicas, definiu-se a sua passagem pelos perfis em U, que servem de suporte e fixação ao solo do painel do painel sandwich. Tendo em conta o exemplo

apresentado na Figura 7, o autoclismo autoportante possui um tubo de esgoto de 90 mm. Com a passagem deste diâmetro entre os perfis, mais uma folga de 5 mm que se atribuiu para a passagem deste, apenas restava 5 mm de chapa das abas do perfil que tornava a secção frágil. Na Figura 47 a) observa-se este problema, levando à necessidade de cortar as abas do perfil para a passagem do tubo. A solução encontrada para resolver este problema passou por desenvolver uma chapa com a mesma espessura e material do perfil, com a largura do e com as abas do mesmo tamanho que o perfil em U, por forma a garantir a resistência suficiente para suportar o painel sandwich e os momentos solicitados. Na Figura 47 b) visualiza-se a apresentação final do perfil em U com a chapa moldada para a passagem do tubo de esgoto do autoclismo autoportante.



a) Experimentação da chapa no perfil.



b) Apresentação final do perfil.

Figura 47 – Perfis em U com chapa moldada para passagem de tubo de esgoto.

A ligação entre o perfil em U e a chapa moldada deve ser feita através de rebites. A chapa deve ser ligada ao perfil em obra com a distância entre esta e o solo, por forma a garantir inclinações que garantam o escoamento de resíduos.

5.6 Ligação do painel sandwich ao topo

A fixação do painel sandwich no topo foi definida no capítulo quatro no assunto do comportamento ao fogo. Definiu-se esta fixação como contínua, como mostra a Figura 48.

Como se pode observar, as cantoneiras de aço não foram colocadas para fixar o painel. Em vez disso, mas com a mesma função de suspensão, definiu-se um perfil em “U” com XPS embutido, de forma a não criar uma ponte térmica. Este perfil é aparafusado às lâminas

do painel sandwich e na face inferior da laje de teto ou pavimento. Foi considerada ainda uma folga de 5 mm entre as lâminas e o apoio superior. Esta fixação permanece constante ao longo dos painéis sandwich.

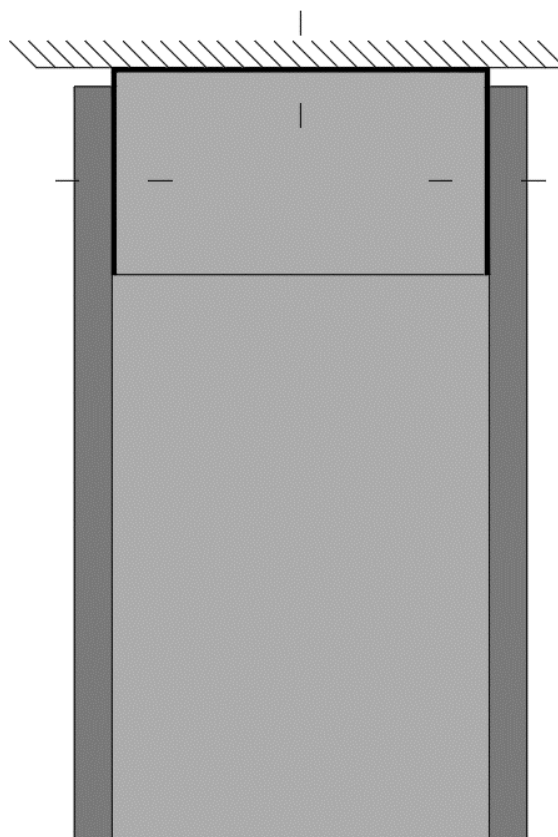


Figura 48 – Corte transversal da ligação do painel sandwich ao topo.

5.7 Ligação dos painéis com aberturas

Com a necessidade de aberturas entre os painéis sandwich para a circulação dos ocupantes, definiu-se uma padieira com as mesmas características de ligação macho-fêmea entre painéis e o mesmo sistema de fixação contínua no topo. Prevê-se que apenas esta fixação no topo é suficiente para suportar este elemento, não ultrapassando uma largura superior a 25 cm (3,70 kg). Na Figura 49 observa-se a disposição dos painéis sandwich com uma abertura para circulação e o respetivo pormenor da obreira dos painéis. Neste caso, também é feita a colagem de uma lâmina com a mesma espessura do núcleo em XPS (100 mm).

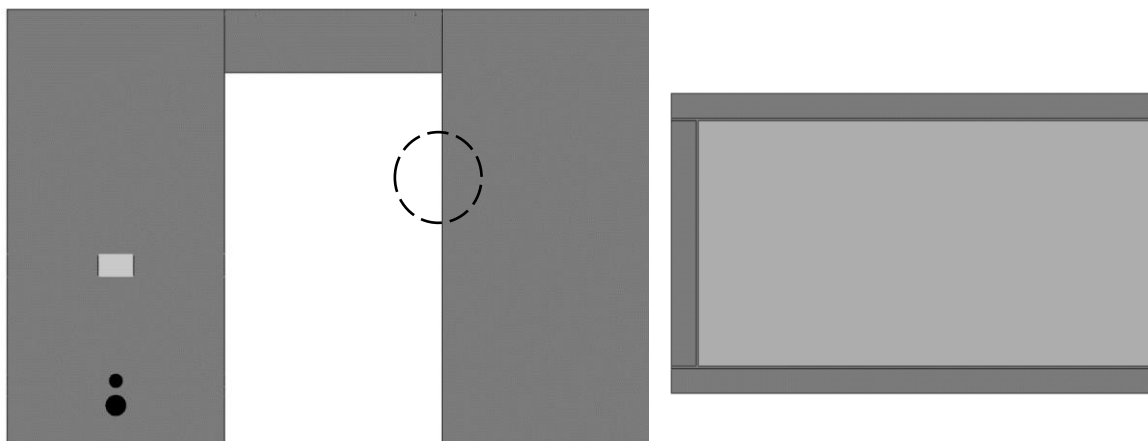


Figura 49 – Disposição dos painéis sandwich com uma abertura, com pormenor da padieira e da ombreira.

5.8 Aparafusamento do painel sandwich no topo e no piso

O sistema mais usual de fixar o painel sandwich, devido a sua facilidade de aplicação e eficiência, é através de parafusos. Quando aplicado em interiores húmidos, os painéis sofrem variações dimensionais com as diferenças da humidade relativa do ar. Por este motivo recomenda-se a utilização de parafusos de cabeça externa associados a uma furação da placa com diâmetro superior ao do parafuso, possibilitando as dilatações e contrações sem que sejam introduzidos esforços. O tipo de parafuso a utilizar deverá ser de aço inox[44].

5.9 Análise económica de soluções para paredes divisórias

Este capítulo prende-se na apresentação e comparação do preço por m², de soluções já existentes na construção de paredes divisórias e também dos painéis em estudo. Todas as soluções que serão apresentadas bem como os materiais para os painéis serão tidos em conta vários aspetos em comum por forma a serem comparados entre si. Estes aspetos são:

- fornecedores portugueses;
- impostos aplicados;
- percentagem de lucro.

O custo de uma parede interior com de 7 cm de espessura, de alvenaria de tijolo cerâmico furado duplo (30x20x7 cm) por revestir: 8,66 euros/m² + Camada de argamassa de cimento, de 10 mm de espessura, com acabamento afagado, aplicada manualmente, sobre paramento interior de alvenaria cerâmica, vertical, até 3 m de altura: 11,53 euros /m² por face. O que perfaz um total de 31,72 euros /m² [84].

O custo de uma parede simples com placas de gesso laminado, formada por uma estrutura simples, com disposição normal; 106 mm de espessura total – 31.96 euros /m² [85].

O custo de uma parede simples, com placas de cimento, formada por uma estrutura simples, 125 mm de espessura total – 79,84 euros /m² [86]

Na Tabela 34 apresentam-se os preços para cada tipo de lâmina obtidos através de catálogos de fornecedores.

Tabela 34 – Custo (euros/m²) por cada tipo de lâmina.

Lâmina	Preço (euros/m ²)	Fonte
XPS	5,16	[87]
	8,02	[88]
MDF	8,15	[89]
	7,15	[89]
MGO	5,90	[90]
OSB	5,89	[91]
	7,50	[92]
	7,12	[93]
PMC	11,22 (branco)	[41]
	23,70 (branco)	[94]
	14,24 (branco)	[95]
	19,32 (cinza)	[94]
	11,63 (cinza)	[95]
	11,92	[84]
	11,22	[96]
PGC	3,55	[97]
	3,51	[98]

O preço final foi obtido através da média do preço, apresentado na Tabela 35, de cada painel multiplicado por 2 e adicionado o preço do painel em XPS. Apesar do número de amostras ser diferente para cada painel, efetuou-se na mesma a média aritmética para cada um. O número de amostras está relacionado com o número de fornecedores disponíveis tendo em conta as características impostas neste caso de estudo. Foi acrescentado o preço da mão de obra que engloba a montagem (6,40 euros/m²) e fase de acabamentos dos painéis (3,60 euros/m²) num total de 10,0 euros/m², com o auxílio de dois operários e 30 minutos/painel de tempo despendido.

Tabela 35 – Preço total (euros /m²) do painel sandwich com a respetiva lâmina e com o núcleo em XPS.

Painel	MDF	MGO	OSB	PMC	PGC
Preço total euros /m ²	24,31	20,56	22,43	38,26	15,82

Comparando os preços obtidos dos painéis sandwich, concluiu-se que o PGC é o que apresenta um preço mais reduzido. Pelo facto de os painéis em gesso cartonado serem muito utilizados no sistema LSF, havendo mais fornecedores deste material e, consequentemente, mais procura, isto pode justificar o seu reduzido preço. O MGO é o painel que apresenta o custo mais reduzido a seguir ao PGC, sendo necessário salientar que só há um fornecedor nacional.

Se continuarem a ser desenvolvidos esforços no sentido de se aprofundar o conhecimento relativo ao comportamento mecânico e ao dimensionamento estrutural de painéis sandwich e de, em paralelo, se conseguirem custos de produção mais reduzidos, é possível que estes materiais venham a ter uma maior aplicabilidade como elementos no sector da construção.

Parte III

CONSIDERAÇÕES FINAIS

6 Conclusões e Perspetivas de Desenvolvimentos Futuros

6.1 Conclusões

Terminado o presente trabalho, pode-se concluir que, em geral, os seus objetivos foram alcançados. Como foi referido, pretendeu-se desenvolver um painel sandwich modular com núcleo em XPS, tendo em vista a sua aplicação como elemento divisorio interior para casas de banho. Nesse sentido, para além do estudo bibliográfico, com o qual foi possível conhecer as características gerais e o comportamento dos painéis sandwich, foi realizado um estudo numérico, onde foram estudados painéis sandwich com cinco diferentes tipos de lâminas: MDF, MGO, OSB, PGC e PMC.

Os diferentes materiais foram definidos como materiais que apresentam um comportamento elástico linear. Posto isto, foram utilizadas equações para determinar a sua resistência quando solicitados a variadas cargas. Estas cargas foram definidas consoante normas nacionais e internacionais. Esta análise foi complementada com o estudo numérico dos painéis sandwich com núcleo em XPS, através de modelos em elementos finitos bidimensional, feita através de SAP2000, tendo assim em conta as deformações causadas pelo esforço transversal. Numa fase inicial deste estudo, as duas análises mostraram que um simples painel em XPS não apresenta capacidade resistente de suportar as diferentes solicitações em estado de serviço, por não cumprir os limites de deformação. Existiu assim, a necessidade de colocar em ambas as faces do XPS, outro material que garantisse a verificação destes limites, e ainda melhorar a sua capacidade de isolamento sonoro, resistência ao fogo e durabilidade.

Através dos critérios estabelecidos pelas normas apresentadas, concluiu-se que o comportamento acústico dos painéis sandwich não é satisfatório e que o som é claramente audível entre compartimentos quando separados pelos painéis sandwich.

Quanto ao comportamento ao fogo dos painéis sandwich, concluiu-se que o painel MGO e o PGC são os que apresentam melhor desempenho quando expostos ao fogo.

Comparando os resultados obtidos do coeficiente de transmissão térmica, concluiu-se que o painel sandwich com núcleo em XPS e lâminas em MDF apresenta uma capacidade de isolamento térmico superior aos restantes painéis.

Através dos resultados obtidos e comparando com o limite de deformação imposto, conclui-se que com a aplicação de materiais em ambas as faces do XPS se satisfaz este critério, mas a solução que apresenta melhor comportamento é o painel em MGO como lâmina do painel sandwich com núcleo em XPS.

Com o desenvolvimento de dois protótipos, concluiu-se que as soluções apresentadas são exequíveis e auxiliaram no detalhe da sua execução. Além disso, as ligações entre painéis foram melhoradas e foi possível determinar o peso de um painel sandwich, assumindo-se transportável por duas pessoas.

Na análise económica realizada para o custo no desenvolvimento de painéis sandwich, concluiu-se que o PGC é o que apresenta menor custo.

O aumento na utilização de painéis sandwich a que se tem assistido nos últimos anos surge associado à necessidade que se tem revelado de se dispor de elementos estruturais mais leves, resistentes, com rigidez elevada, duráveis e mais económicos.

6.2 Perspetivas de desenvolvimentos futuros

Os painéis sandwich fazem parte de uma das muitas soluções construtivas recentes no setor da engenharia civil. Isto torna o campo de investigação deste material, e estrutura, muito alargado e merecedor de se tornar um objeto de estudo. No presente trabalho desenvolvido, depois de apresentadas as conclusões, toma-se consciência de que se trata de um ponto de partida para trabalhos futuros. Nesse sentido, são indicados, em seguida, vários aspetos e matérias possíveis de serem desenvolvidos e investigados em futuros trabalhos:

- Estudo experimental e numérico do comportamento dos painéis sandwich em situação de incêndio;
- Estudo experimental e numérico do comportamento dos painéis sandwich como isolamento acústico;
- Estudo experimental e numérico da durabilidade a longo prazo dos painéis sandwich;
- Estudo experimental e numérico dos sistemas de ligação dos painéis entre si e a outros elementos construtivos;
- Estudo do comportamento à fluência, realizando-se ensaios em ambiente controlado, para vários níveis de temperatura, humidade e carga, caracterizando o

comportamento do painel, bem como o comportamento do núcleo e da lamina, separadamente;

- Avaliação da viabilidade económica do uso dos painéis sandwich e do caso de estudo em comparação com uma solução tradicional;
- Avaliação mais aprofundada sobre métodos de rotura dos painéis ao variar as suas dimensões;
- Realizar uma caracterização mais aprofundada e completa das suas características e efetuar uma ficha técnica com as mesmas, com a vista à comercialização do painel;
- Aplicação da metodologia Life Cycle Engineering com o objetivo de avaliar os desempenhos das lâminas para o painel sandwich com base nas três análises: Life Cycle Cost, Life Cycle Assessment e Desempenho Técnico;
- Aplicação da metodologia Multi-attribute Utility Analysis no desenvolvimento dos painéis sandwich sobre a importância de três fatores: o preço de mercado do produto, o impacto ambiental e a qualidade de produto;

Bibliografia

- [1] J. M. Dias, M. Baião, and M. J. F. Silva, “Soluções construtivas recentes de paredes interiores e exteriores de edifícios - desempenho funcional e durabilidade,” *Eng. para a Soc. Investig. e inovação - Cid. e Desenvolv.*, p. 2012, 2012.
- [2] H. De Sousa, “Alvenarias em Portugal. Situação actual e perspectivas futuras,” *Semin. sobre paredes Alvenaria*, pp. 17–40, 2002.
- [3] Correia, “Patologia de alvenaria de tijolo,” p. 105, 2015.
- [4] M. Architecta, M. Alexandra, and C. Miranda, “LIGHT STEEL FRAME: UM PERCURSO,” pp. 18–23.
- [5] S. Sousa, “Prevenção De Riscos Profissionais Na Construção.”
- [6] G. Vasconcelos *et al.*, “Proposta De Uma Solução Inovadora E Eco-Eficiente,” *Paredes Div. Passado, Present. e Futur.*, pp. 185–204, 2011.
- [7] M. Coimbra, “HABITAÇÃO (colectiva) MODULAR PRÉ-FABRICADA :,” 2009.
- [8] M. do A. do O. do T. e do D. Regional, “Decreto-Lei n.º96/2008.” 2008.
- [9] R. de D. E. dos E. de H. (REH), “Decreto-Lei n.º 118/2013.” pp. 4988–5005, 2013.
- [10] Portuguese Government, “Decreto-Lei n.º 224/2015 de 9 de outubro, procede à primeira alteração ao Decreto -Lei n.º 220/2008, de 12 de novembro, que aprova o regime jurídico da segurança contra incêndio em edifícios,” *Diário da República / Off. J. Port. Repub.*, vol. 1, no. 198, pp. 8740–8774, 2015.
- [11] C. P. Santos, “Evolução das soluções de paredes face a novas exigências regulamentares,” *Semin. sobre Paredes Alvenaria*, pp. 41–64, 2007.
- [12] E. Civil, “Sérgio Miguel Pinto de CONSTRUÇÃO MODULAR – DESENVOLVIMENTO Almeida Patinha DA IDEIA: CASA NUMA CAIXA,” 2011.
- [13] S. C. I. R. M. Lawson, “Building design using modules,” pp. 1–16, 2007.
- [14] V. H. dos S. de J. Pinto, “Soluções De Paredes Leves Incorporando Placas de Aglomerado Madeira/Cimento para Edifícios de Pequeno Porte.” 2010.
- [15] R. P. S. de Bastos, “Projeto de estruturas com perfis em aço enformados a frio.” Aveiro, 2013.
- [16] A. A. Brasileira, D. N. Técnicas, N. De Normalização, and A. Normas, “ABNT NBR 15575-4_2013 Edificações habitacionais — Desempenho Parte 4: Sistemas de

- vedações verticais internas e externas -SVVIE Prefácio.”
- [17] EOTA, “Determination of impact resistance of panels and panel assemblies - TR 001,” *Tech. Rep.*, no. Fevereiro, pp. 1–9, 2003.
- [18] T. N. No, “TN 76 Impact performance of building envelopes : method for impact testing of cladding panels,” no. 76, pp. 1–6, 2012.
- [19] A. Manalo, “Structural behaviour of a prefabricated composite wall system made from rigid polyurethane foam and Magnesium Oxide board,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 41, pp. 642–653, 2013.
- [20] NP EN 1991-1-1, “Eurocódigo 1 - Ações em Estruturas - Parte 1-1: Ações Gerais - Pesos volúmicos, pesos próprios, sobrecargas em edifícios,” *Inst. Port. da Qual.*, p. 44, 2009.
- [21] EOTA, “ETAG 003: GUIDELINE FOR EUROPEAN TECHNICAL APPROVAL for INTERNAL PARTITION KITS FOR USE AS NON-LOADBEARING WALLS,” no. April 2012, p. 69, 2012.
- [22] ITeCons, “Caracterização mecânica de uma divisória de compartimentação leve (ETAG003:1998),” Coimbra.
- [23] Instituto Português da Qualidade, “Marcação CE,” 2018. [Online]. Available: <http://www1.ipq.pt/pt/assuntoseuropeus/marcacaoce/Pages/MarcacaoCE.aspx>. [Accessed: 16-Jun-2018].
- [24] LNEC, “Regras para a concessão de uma aprovação técnica europeia (ETA) ou de um documento de homologação (DH) a sistemas compósitos de isolamento térmico pelo exterior (ETICS),” 2010.
- [25] “Ray McIntire.” [Online]. Available: <http://www.invent.org/honor/inductees/inductee-detail/?IID=383>. [Accessed: 03-Oct-2018].
- [26] B. Linnert, E. G., Md, “United States Patent Office,” pp. 2–4, 1952.
- [27] J. M. Davies, *Lightweight Sandwich Construction*. Oxford OX2 0EL: Blackwell Science Lta, 2001.
- [28] “Fibran XPS.” [Online]. Available: <https://www.fibran.com.pt/frontend/articles.php?cid=96>. [Accessed: 02-Oct-2018].
- [29] S. Group, “Gama xps.” 2017.
- [30] European Organisation for Technical Approvals, “External Thermal Insulation

- Composite Systems (Etics) With Rendering,” no. March 2000, 2013.
- [31] O.-S. Sanitários S.A., “OLI74 Plus.” [Online]. Available: https://www.oliworld.com/pt/produtos/instalacao_sanitaria/autoclismos_interiores/oli74_plus_.html?sis=a87ff679a2f3e71d9181a67b7542122c#.
- [32] Fibranxps, “Turquoise extruded polystyrene.” [Online]. Available: <http://www.fibran.si/files4users/files/brochures/EN/EN01.JPG>. [Accessed: 10-Oct-2018].
- [33] Vescom, “camada vinílica estampada com tintas à base de água e base de algodão + Vescom Protect.” [Online]. Available: <https://www.vescom.com/pt/dessin/delta-healthcare>.
- [34] E. S. A. Neto, *Deformação e Deslocamentos na Flexão*. 2017.
- [35] L. Dinis, “Leis constitutivas,” FEUP, pp. 1–16.
- [36] N. Institutt for konstruksjonsteknikk, *STALKONSTRUKSJONER PROFILER OG FORMLER*, 3rd ed. Bergen, 2003.
- [37] International Code Council, *International Building Code (IBC)*. 2009.
- [38] C. Portugal, “SAP2000,” 2018. [Online]. Available: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:Dyrfgy08qPsJ:www.csiportugal.com/software/2/sap2000+&cd=1&hl=pt-PT&ct=clnk&gl=pt>. [Accessed: 23-Oct-2018].
- [39] E. Mec *et al.*, “João Alexandre Dias de Oliveira Metodologias de Optimização Topológica em Cálculo Estrutural Topology Optimisation Methodologies for Structural Analysis,” 2013.
- [40] H. G. Allen, *Analysis and Design of Structural Sandwich Panels*. Oxford: Pergamon Press Ltd., 1969.
- [41] M. madeira S.a., “Mdf hidrofugo / ignifugo laminado.” 2016.
- [42] A. E. Lda, “Magnésiopan Innovations Portugal Brochura Fogo e Acústica.” [Online]. Available: www.magnesiopan.com. [Accessed: 19-Apr-2018].
- [43] S. Arouco, “OSB,” 2018. [Online]. Available: https://www.sonaearauco.com/pt/produtos/produtos-para-construcao-e-mobiliario/osb_519.html. [Accessed: 19-Aug-2018].
- [44] Investwood, “viroc - Dossier Técnico.” p. 29.
- [45] G. IBÉRICA, “Manual técnico. Instalação de sistemas em placas de gesso,” 2007.

-
- [46] J. P. Davim, V. C. Clemente, and S. Silva, "Surface roughness aspects in milling MDF (medium density fibreboard)," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 40, no. 1–2, pp. 49–55, 2009.
- [47] Investwood, "Fichas de Aplicação," 2013.
- [48] P. Editora, "Usinagem," 2018. [Online]. Available: <https://www.infopedia.pt/dicionarios/lingua-portuguesa/usinagem%0AENVIAR%0ASUGESTÃO%0AOU%0ACOMENTÁRIO%09>. [Accessed: 17-Sep-2018].
- [49] S. Arouco, "Innovus Coloured MDF," 2018. [Online]. Available: https://www.sonaearauco.com/pt/produtos/innovus-produtos-decorativos/coloured-mdf_535.html. [Accessed: 18-Sep-2018].
- [50] F. Wang, L. Yang, L. Guan, and S. Hu, "Microstructure and properties of cement foams prepared by magnesium oxychloride cement," *J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Ed.*, vol. 30, no. 2, pp. 331–337, 2015.
- [51] A Exclusiva, "Ficha técnica MAGNÉSIOPAN," 2017.
- [52] R. Thomas, "MgO Boards," 2007. [Online]. Available: <https://www.wconline.com/articles/85449-mgo-board>. [Accessed: 17-Sep-2018].
- [53] G. Li, Y. Yu, J. Li, Y. Wang, and H. Liu, "Experimental study on urban refuse/magnesium oxychloride cement compound floor tile," *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 10, pp. 1663–1668, 2003.
- [54] North Dakota Department of Transportation, "Design Manual," 2014.
- [55] S. Iwakiri, "Painéis de partículas orientadas OSB," *41*, pp. 52–53, 1999.
- [56] KronoFrance, "Conselhos de utilização," 2005.
- [57] E. C. F. STANDARDIZATION, "Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings," vol. 1, no. 2004, 2011.
- [58] Futureng, "Durabilidade das placas OSB." [Online]. Available: <http://www.futureng.pt/durabilidade-das-placas-osb>.
- [59] J. V. D. F. Latorraca, "Eucalyptus spp. NA PRODUÇÃO DE PAINÉIS DE CIMENTO-MADEIRA," pp. 1–191, 2000.
- [60] Investwood, "Ficha de Produto Viroc Cement Bonded Particle Board," 2013.
- [61] M. P. de Oliveira, "Materiais compósitos à base de gesso contendo EVA (Etileno Acetato de Vanila) e Vermiculita: otimização de mistura e propriedades termomecânicas," pp. 1–50, 2009.

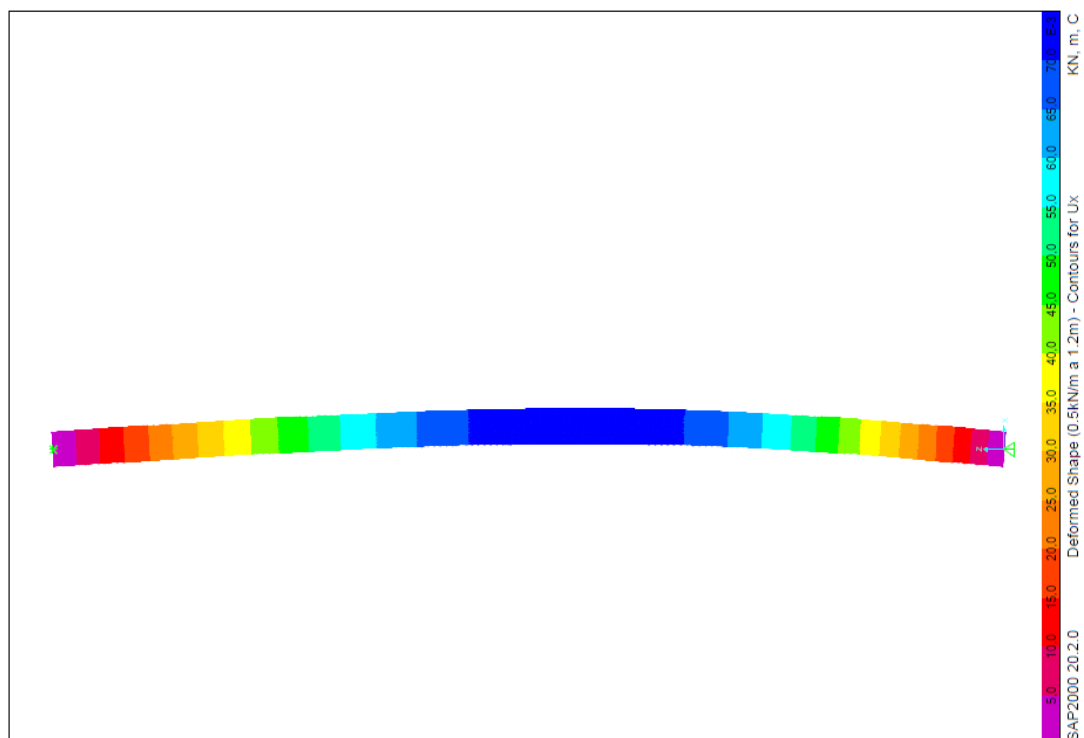
-
- [62] S. M. de O. Lopes, “Conceção e produção de placas de gesso laminado,” pp. 9–24, 2012.
- [63] Fermacell, “fermacell Gypsum Fibreboard,” 2018.
- [64] R. Filipe and J. Faria, “Construção com Painéis Sanduíche de Silicato de Cálcio, Cimento e EPS,” 2014.
- [65] B. Dias, *Manual de Alvenaria de Tijolo*, 2ª. Coimbra, 2009.
- [66] S. A. CYPE Ingenieros, “Memória de Cálculo Cypevac 3D.”.
- [67] A. Rafaela and P. Caixeiro, “Soluções Técnicas para Isolamento Sonoro de Edifícios de Habitação Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil,” 2007.
- [68] Ministério da Administração Interna, “Decreto-Lei nº 220/2008, de 12 de novembro,” *Diário da República*, pp. 7903–7922, 2008.
- [69] T. e C. Ministério das Obras Públicas, *Decreto-Lei n.º 80/2006*. Portugal, 2006, pp. 2468–2513.
- [70] C. A. Pina and L. Matias, *COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DE ELEMENTOS DA ENVOLVENTE DOS EDIFÍCIOS*. Lisboa, 2006.
- [71] S. Tsen and M. Jumaat, “Comparison of Eurocodes EN310 and EN789 in Determining the Bending Strength and Modulus of Elasticity of Red Seraya Plywood Panel,” *Waset.Ac.Nz*, vol. 6, no. 1, pp. 555–559, 2012.
- [72] wedi, “Technical datasheet wedi 610 | adhesive sealant Technical datasheet.” pp. 1–2.
- [73] EOTA, “ETAG 022-1:2007 Watertight Covering Kits for Wet Room Floors and or Walls - Part 1: Liquid Applied Coverings with or Without Wearing Surface,” no. December 1988, 2007.
- [74] NEVPANEL, “JOINT TAPE.” [Online]. Available: <http://www.nevpanel.com.tr/joint-tape>. [Accessed: 08-Nov-2018].
- [75] NEVPANEL, “JOINTING PASTE.” [Online]. Available: <http://www.nevpanel.com.tr/jointing-paste>. [Accessed: 08-Nov-2018].
- [76] A. E. Lda, “Magnésiopan Innovations Portugal Brochura de Instalação,” 2017.
- [77] Pladur, “GAMA DE PRODUTOS PLADUR.”
- [78] LNEC, “M/106 – produtos de gesso,” pp. 1–6, 2018.
- [79] Knauf, “Juntas.” [Online]. Available: <http://www.knauf.pt/solucoes/massas/massas->

- juntas/unik-hydro-1h.html.
- [80] Quimicryl, “Chapas de OSB.” [Online]. Available: http://www.quimicryl.com.br/img_arq/%7BE892E4AE-E01E-431C-AC38-2E71C84947F0%7D_revest-osb.pdf. [Accessed: 08-Nov-2018].
- [81] SIKA, “Sikaflex ® -11 FC,” 2011. [Online]. Available: https://prt.sika.com/content/portugal/main/pt/solutions_products/02/02a008/02a008sa04.html.
- [82] SIKA, “Sikacryl ® -S,” 2012. [Online]. Available: https://prt.sika.com/content/portugal/main/pt/solutions_products/02/02a008/02a008sa04.html. [Accessed: 08-Nov-2018].
- [83] EOTA, “ETAG 014:2011 Plastic Anchors for Fixing of External Thermal Insulation Composite Systems with Rendering,” no. January 2002, 2011.
- [84] S. A. CYPE Ingenieros, “Gerador de preços para construção civil. Portugal.” [Online]. Available: <http://www.geradordeprecos.info/>. [Accessed: 31-Oct-2018].
- [85] S. A. CYPE Ingenieros, “Parede de placas de gesso laminado, para grandes alturas, sistema ‘KNAUF.’” [Online]. Available: http://www.geradordeprecos.info/obra_nova/Fachadas__divisoes_e_proteccoes/Paredes_divisórias_de_placas/De_placas_de_gesso_laminado/FBY019_Parede_de_placas_de_gesso_laminado_.html.
- [86] S. A. CYPE Ingenieros, “Parede de placas de cimento, sistema ‘KNAUF.’” [Online]. Available: http://www.geradordeprecos.info/obra_nova/calculaprecio.asp?Valor=2%7C0_0%7C6%7CFBC010%7Cfbc_010:c9_0_1c9_0. [Accessed: 04-Nov-2018].
- [87] Knauf, “Tabela de preços.” 2017.
- [88] MADEIVOUGA madeiras s.a., “MDF,” vol. 2. 2018.
- [89] COVEMA, “MDF CRU HIDRÓFUGO.” 2011.
- [90] A. E. Lda, “Dados técnicos Magnésiopan board,” 2017.
- [91] O. e O. na C. Civil, “OSB.” [Online]. Available: <https://orcamentos.eu/precos-de-placas-de-osb/>. [Accessed: 31-Oct-2018].
- [92] AGEPAN, “Aglomerado de partículas de madeira longas e orientadas OSB,” vol. 2, no. mm. p. 2013, 2013.
- [93] MADEIVOUGA madeiras s.a., “OSB.” 2013.

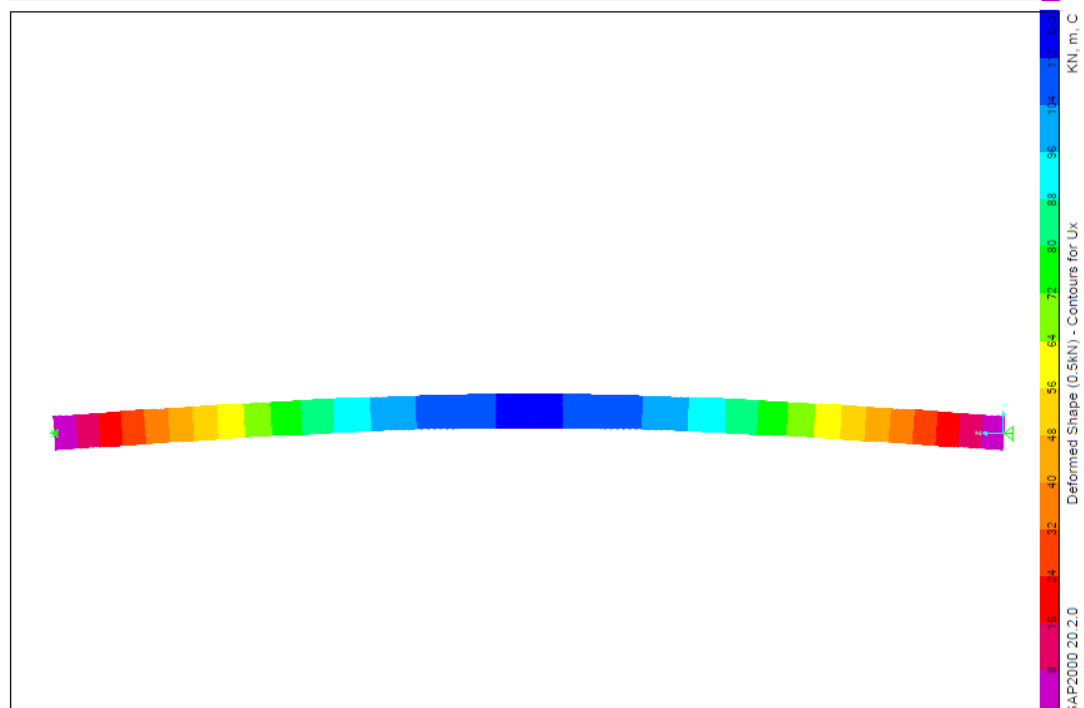
- [94] MADEIVOUGA madeiras s.a., “VIROC,” vol. 2. p. 2018, 2018.
- [95] O. e O. na C. Civil, “Preços de painéis de madeira cimento Viroc.” [Online]. Available: <https://orcamentos.eu/precos-de-paineis-de-madeira-cimento-viroc/>.
- [96] SOTECNISOL, “OBRAS 360.” [Online]. Available: <https://www.obras360.pt/loja/euronit/0170140003en-painel-duripanel-b1>. [Accessed: 31-Oct-2018].
- [97] L. SIPER Sociedade de Isolamentos, “PLACAS DE GESSO CARTONADO ‘ N ’ TERMINAÇÃO NORMAL.” 2014.
- [98] G. IBÉRICA, “Tabela de Preços - Placas de gesso e massa, perfis e acessórios,” 2013.

Anexo A – Deformações XPS

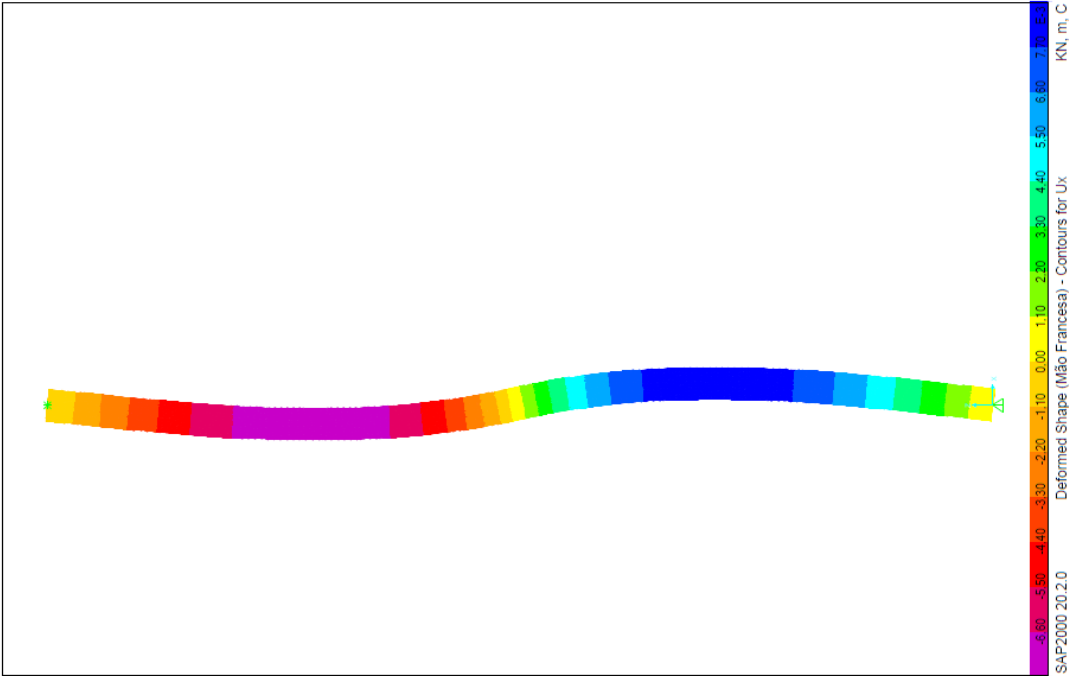
Deformação (m) $q = 0,50 \text{ kN/m}$ (até 1,20 m)



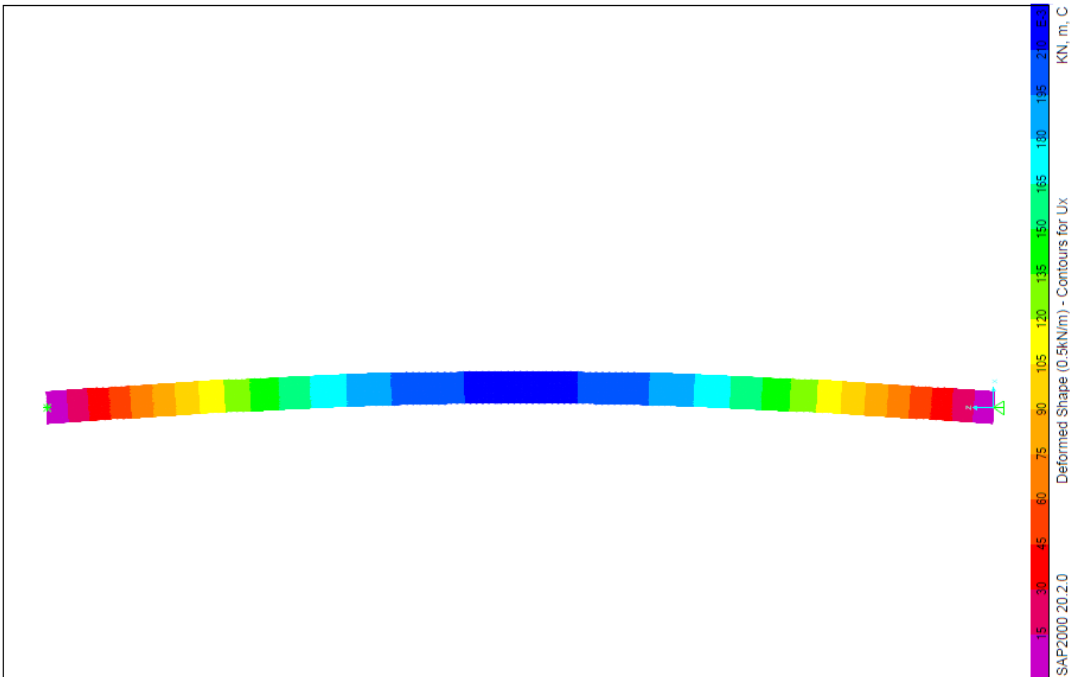
Deformação (m) $P = 0,50 \text{ kN}$



Deformação (m) Mão-francesa

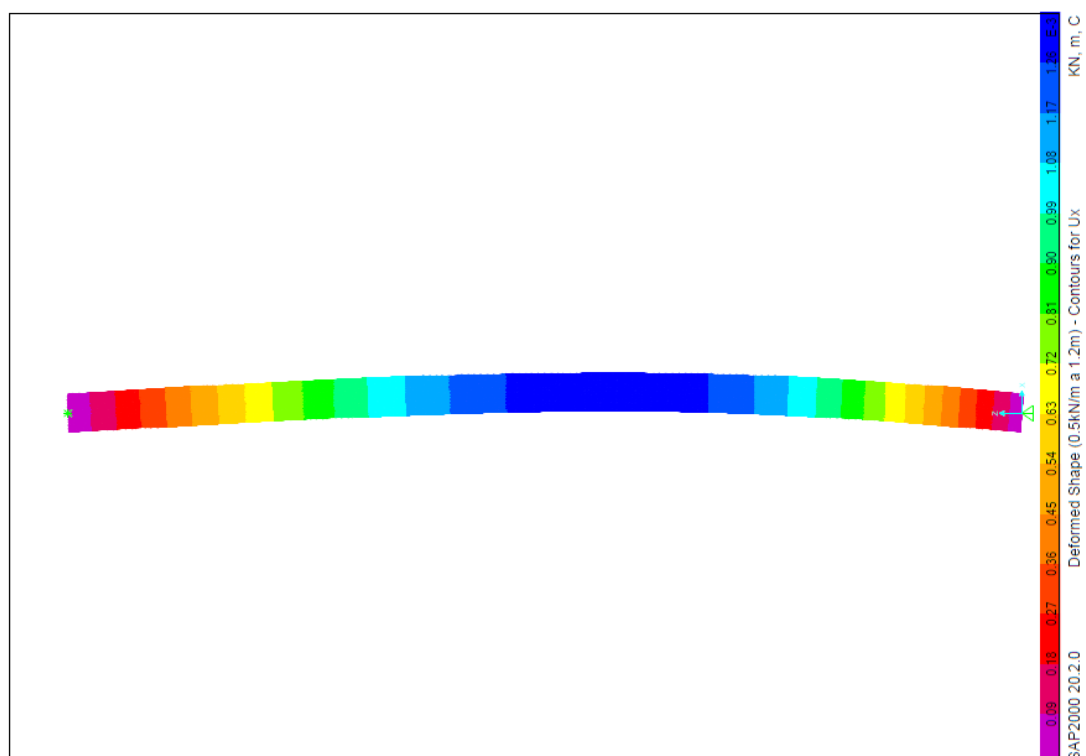


Deformação (m) $q = 0,50 \text{ kN/m}$

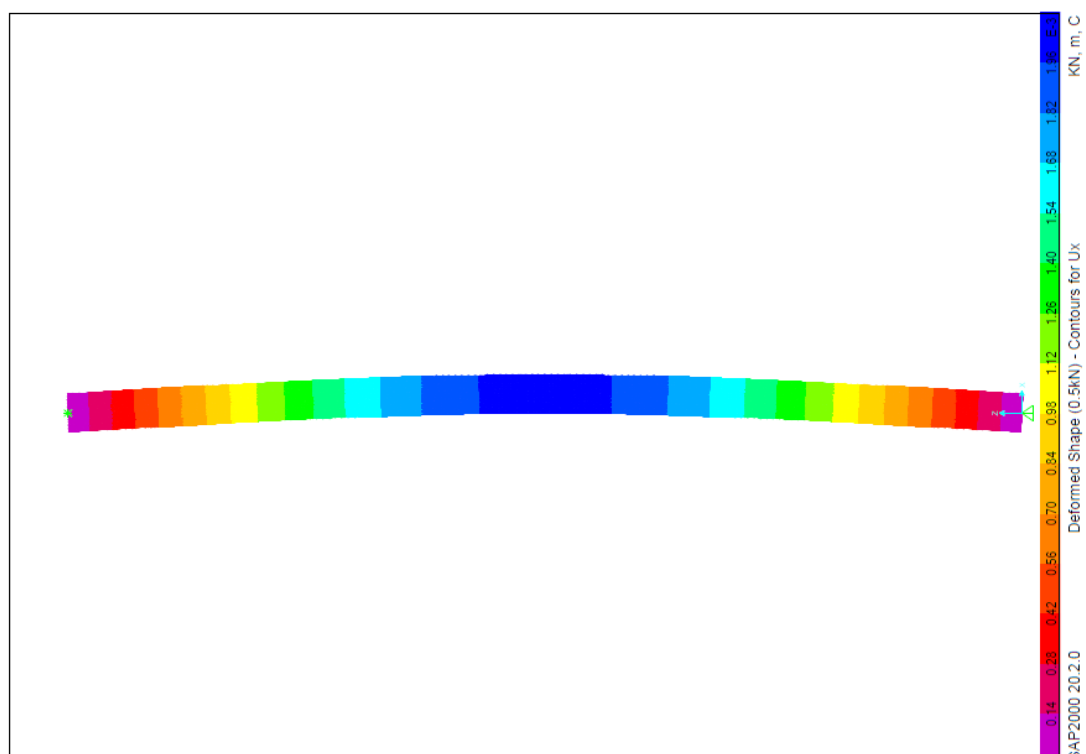


Anexo B – Deformações MDF

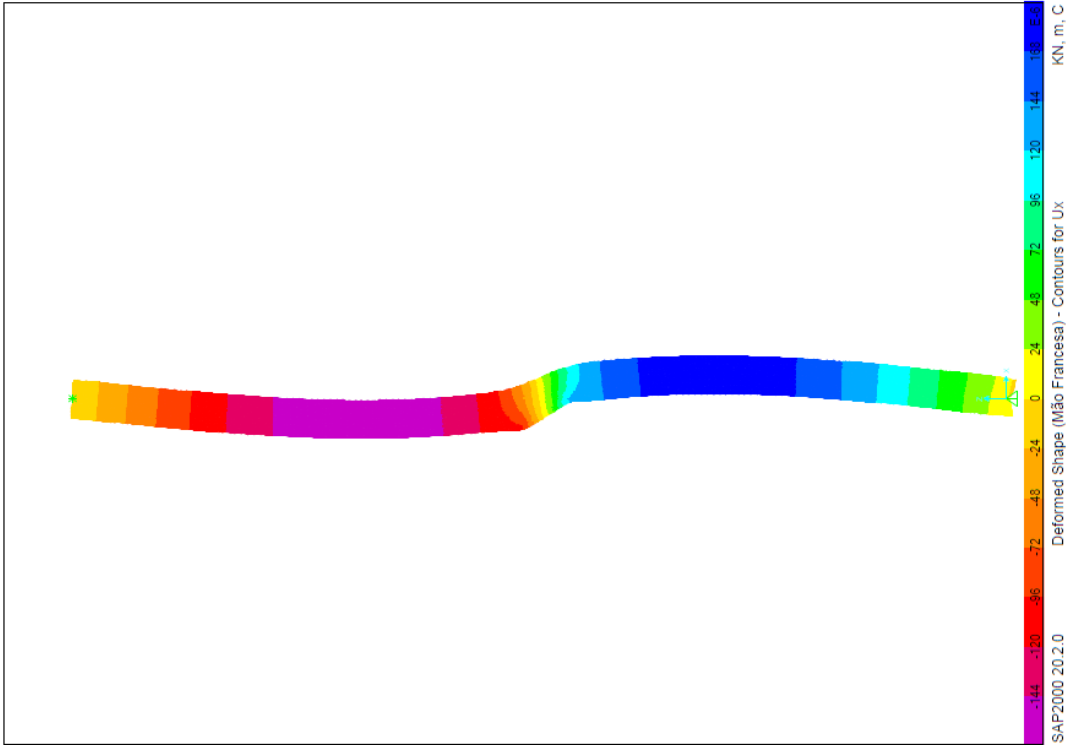
Deformação (m) $q = 0,50 \text{ kN/m}$ (até 1,20 m)



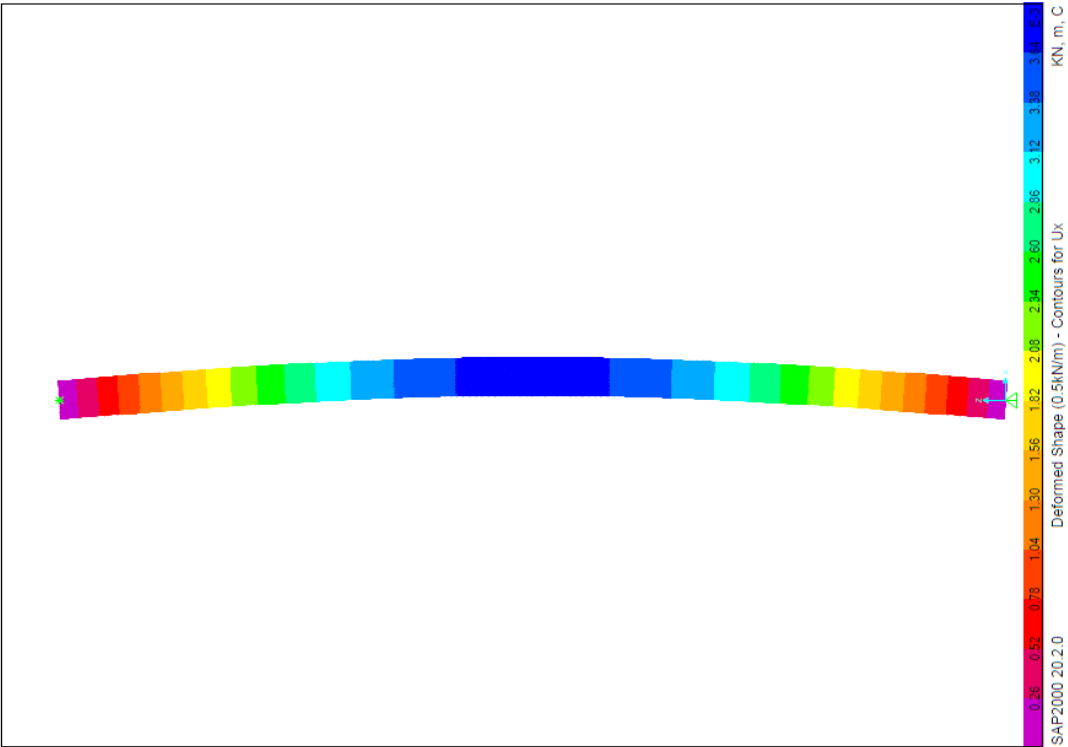
Deformação (m) $P = 0,50 \text{ kN}$



Deformação (m) Mão-francesa

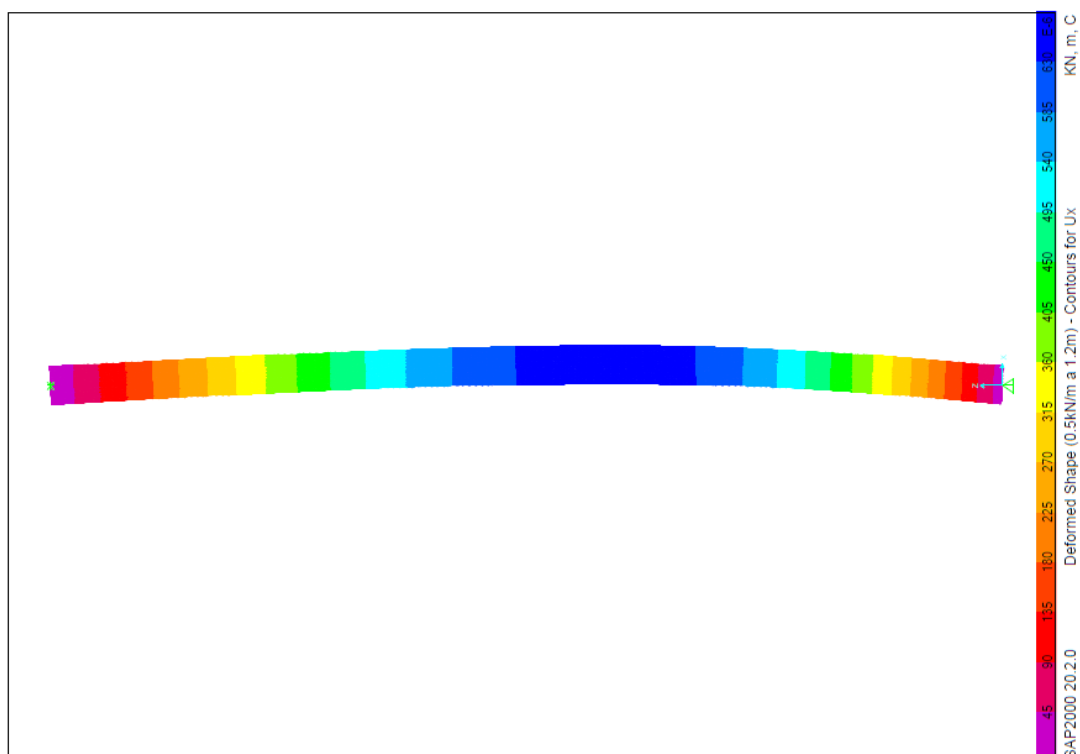


Deformação (m) $q = 0,50 \text{ kN/m}$

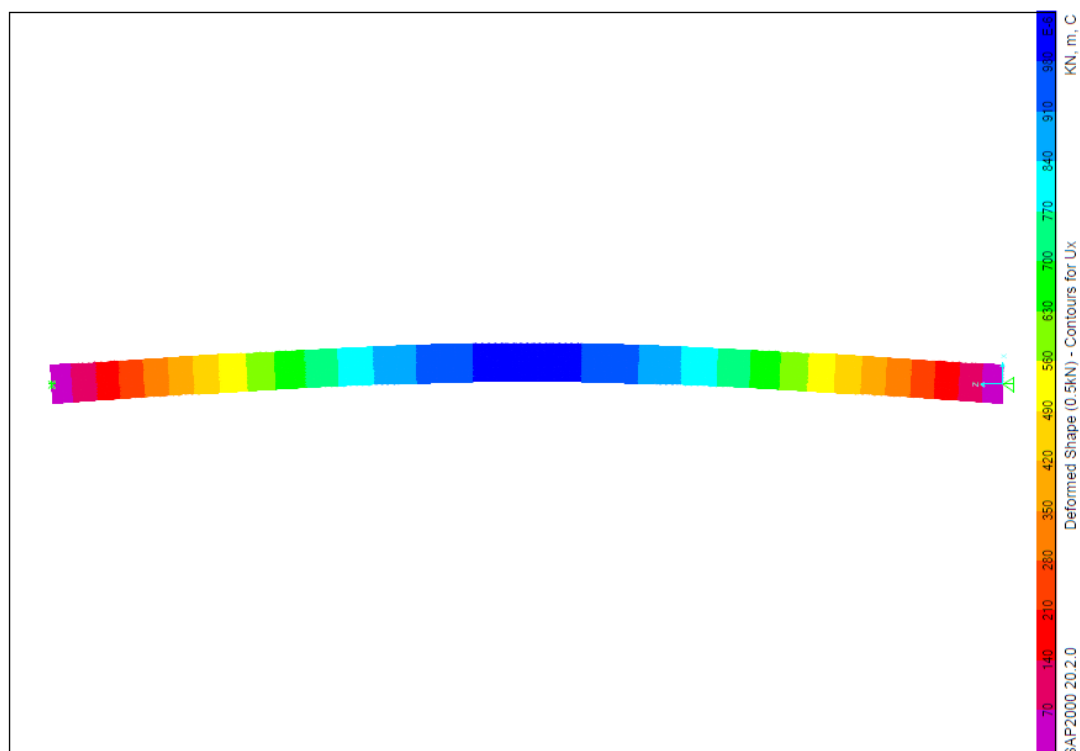


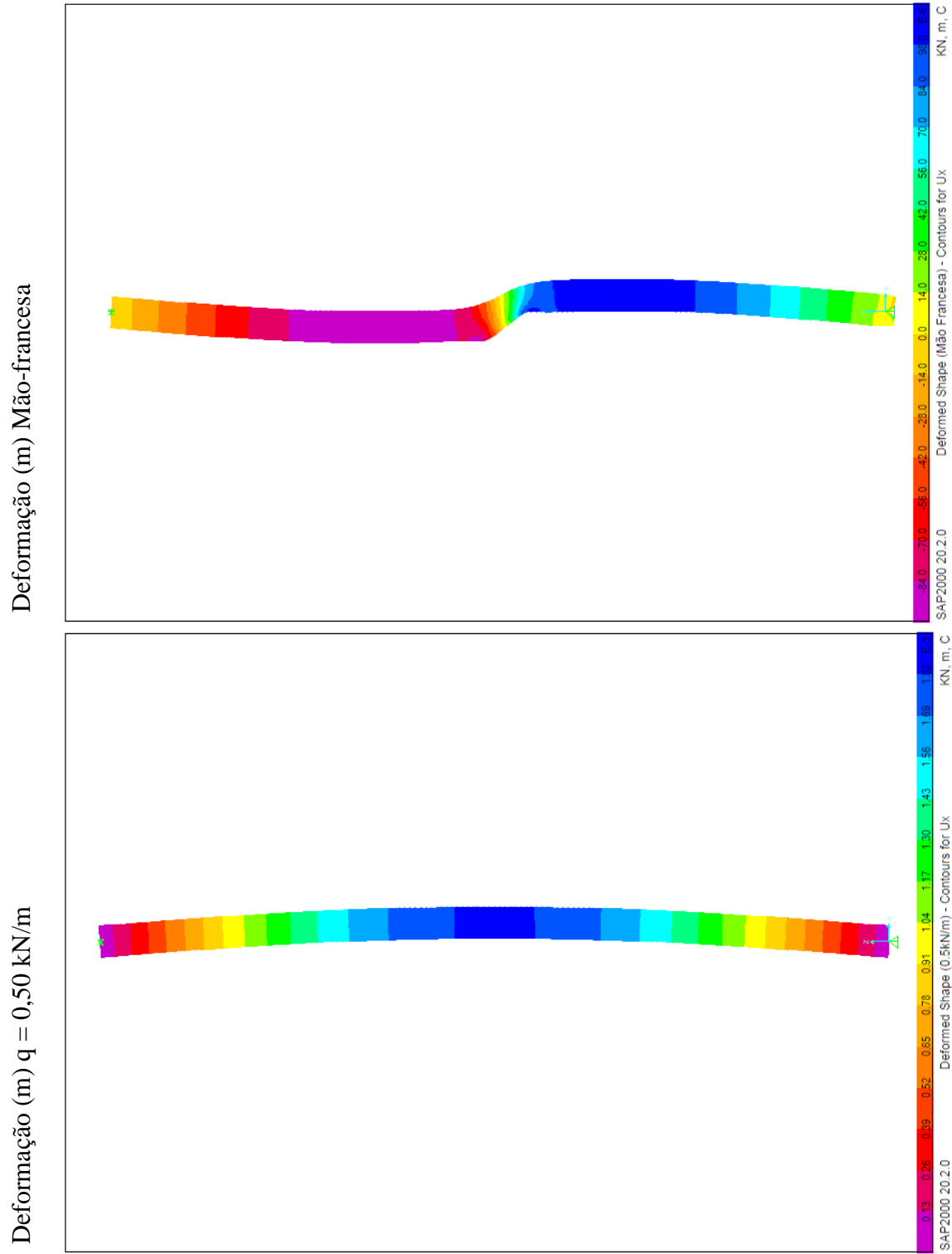
Anexo C – Deformações MGO

Deformação (m) $q = 0,50 \text{ kN/m}$ (até 1,20 m)



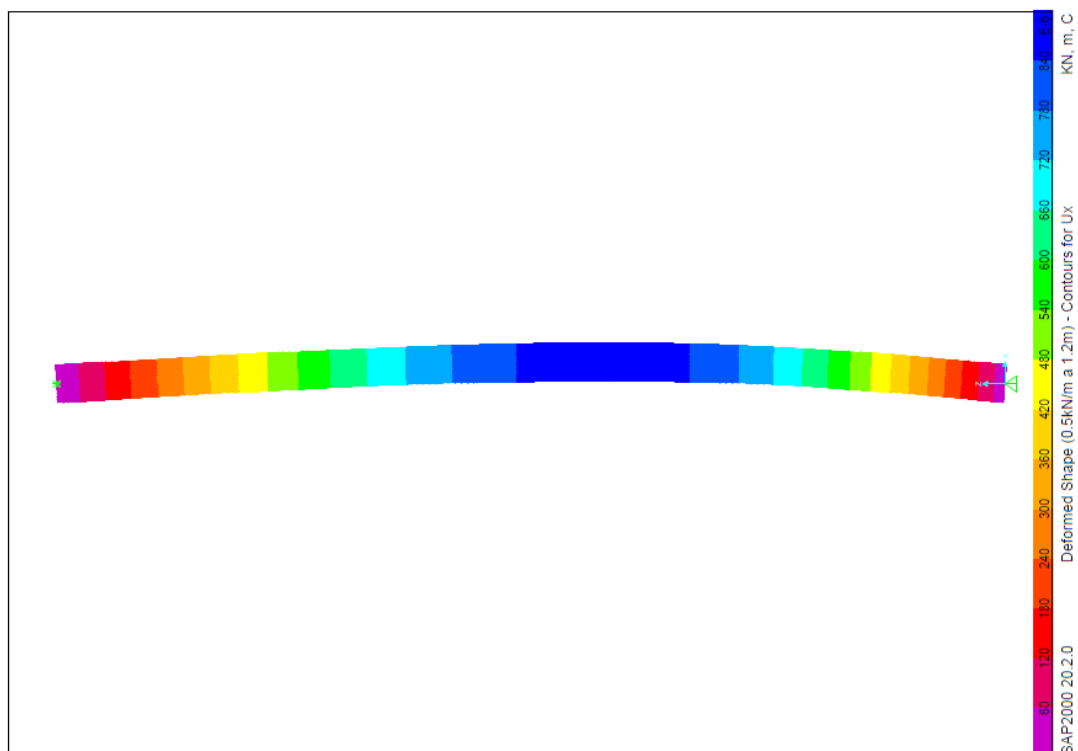
Deformação (m) $P = 0,50 \text{ kN}$



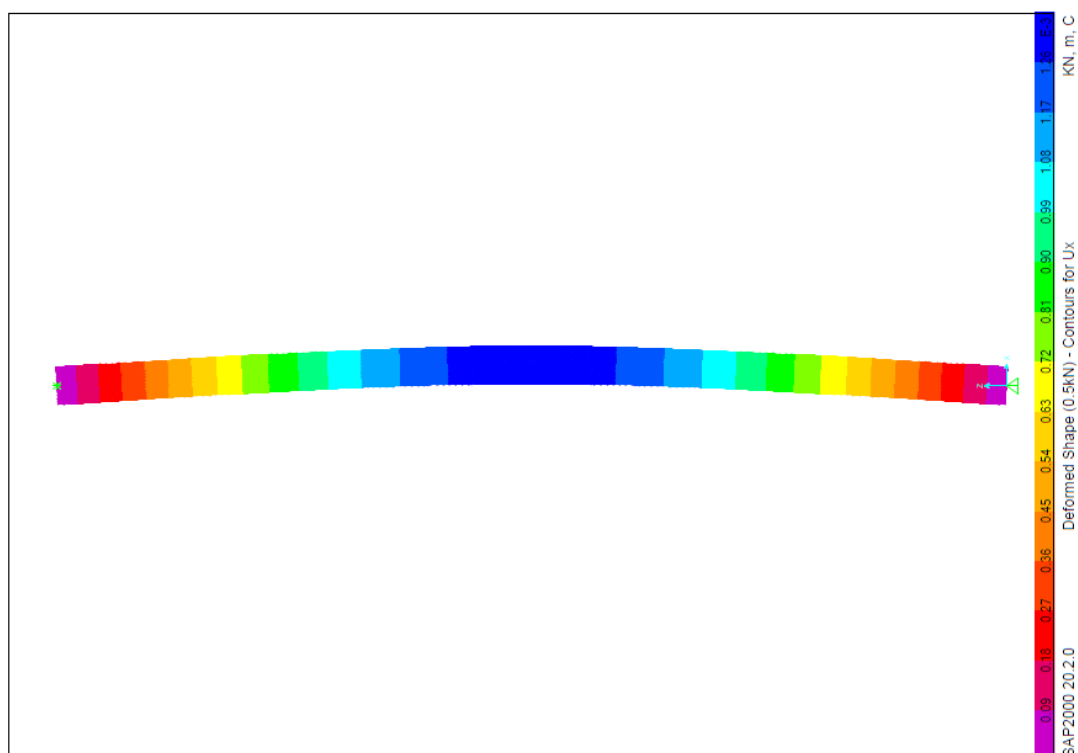


Anexo D – Deformações OSB

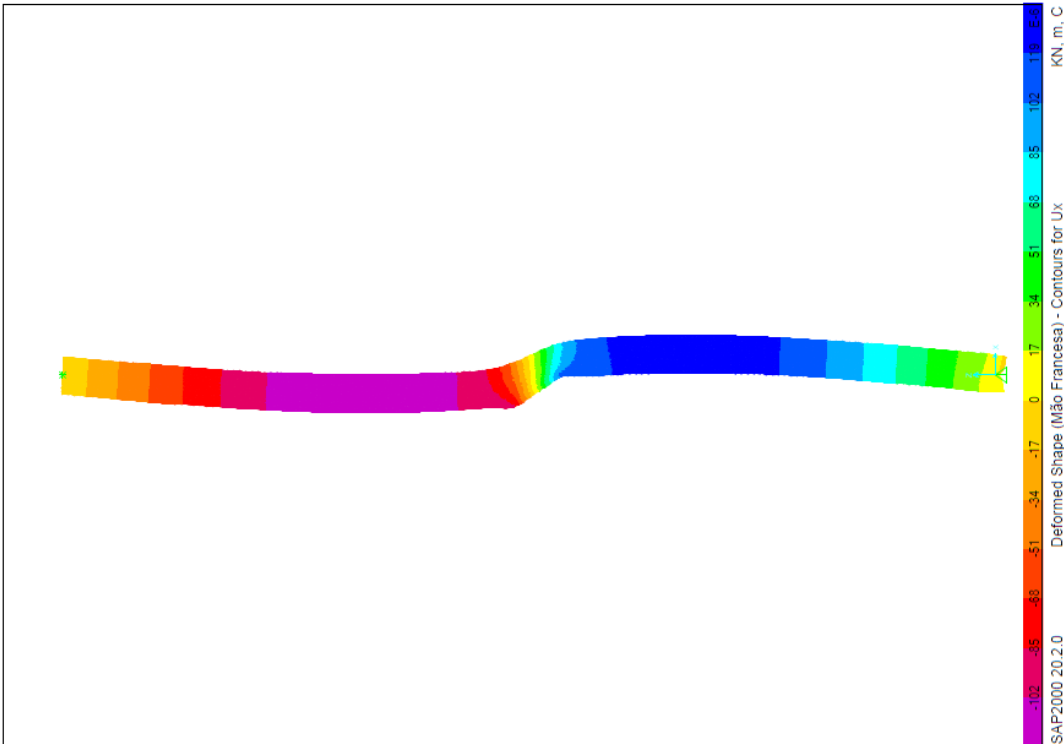
Deformação (m) $q = 0,50 \text{ kN/m}$ (até 1,20 m)



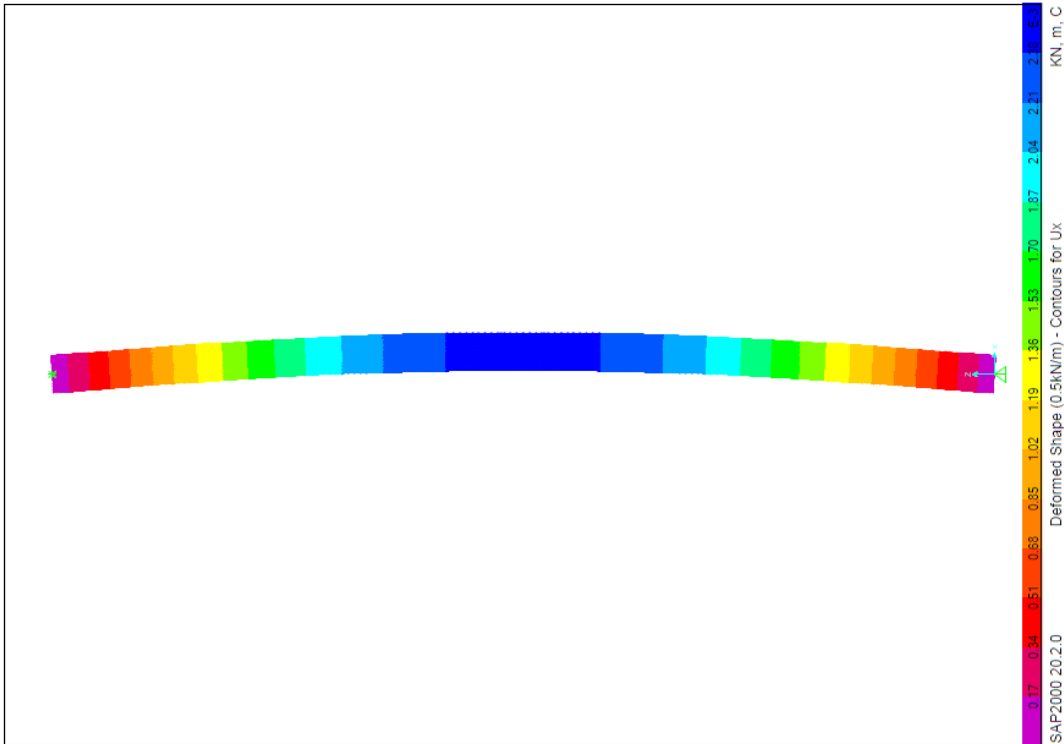
Deformação (m) $P = 0,50 \text{ kN}$



Deformação (m) Mão-francesa

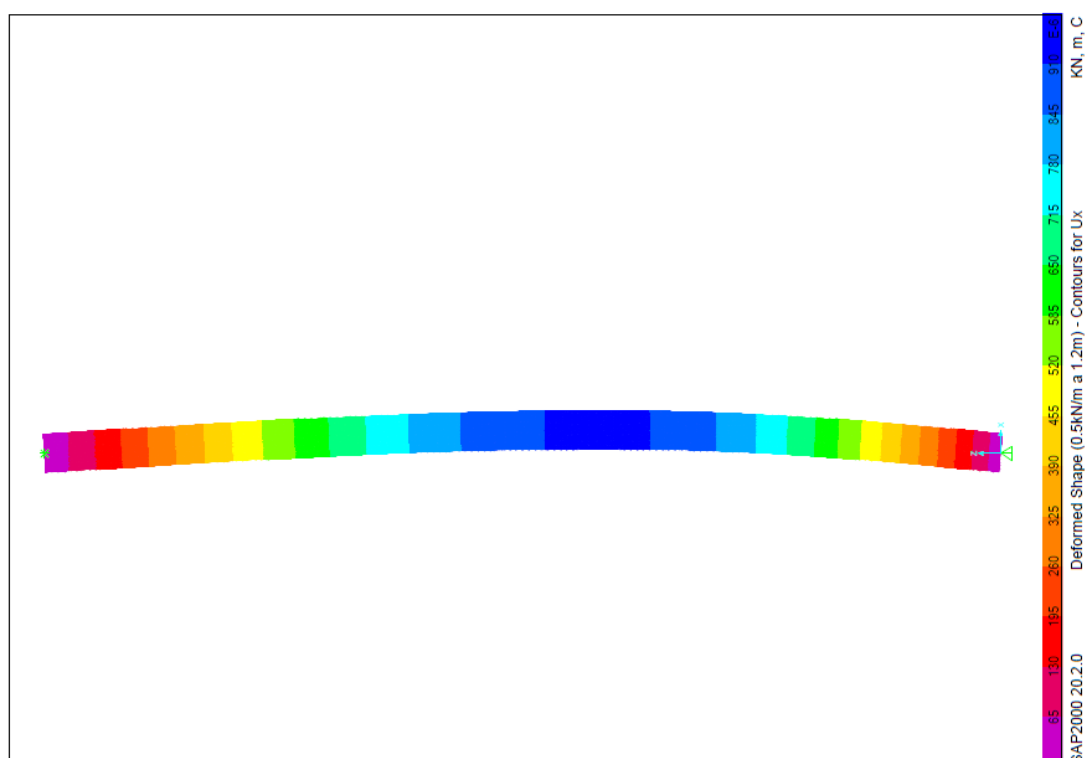


Deformação (m) $q = 0,50 \text{ kN/m}$

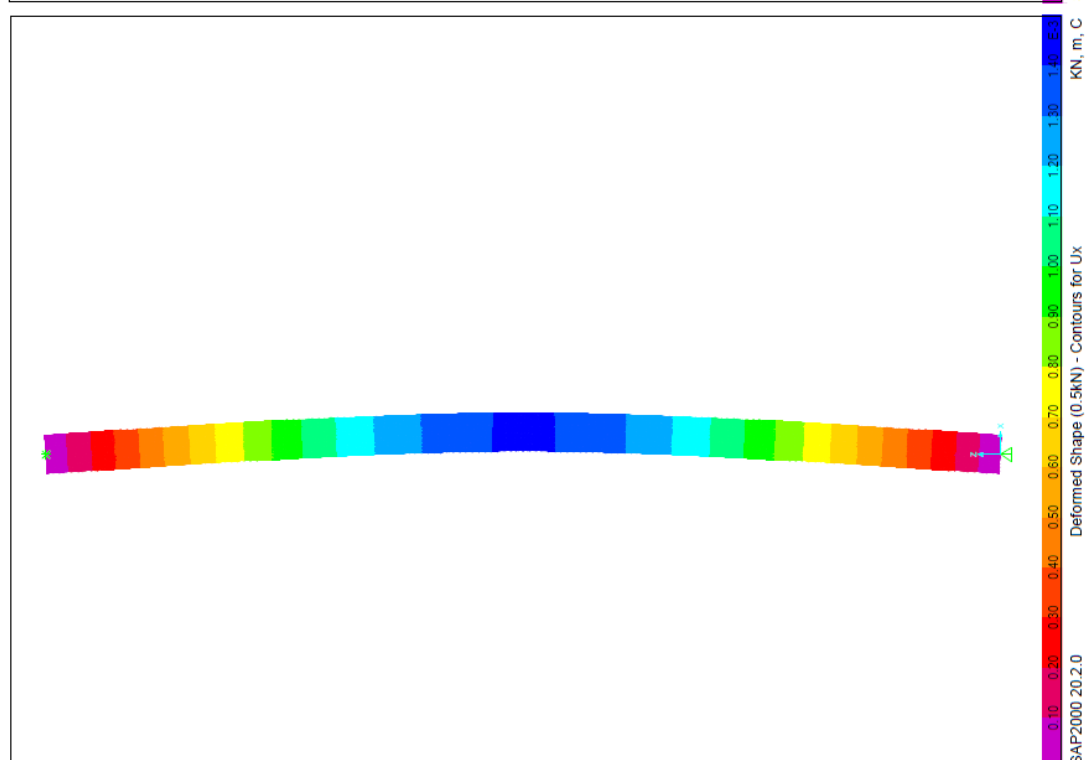


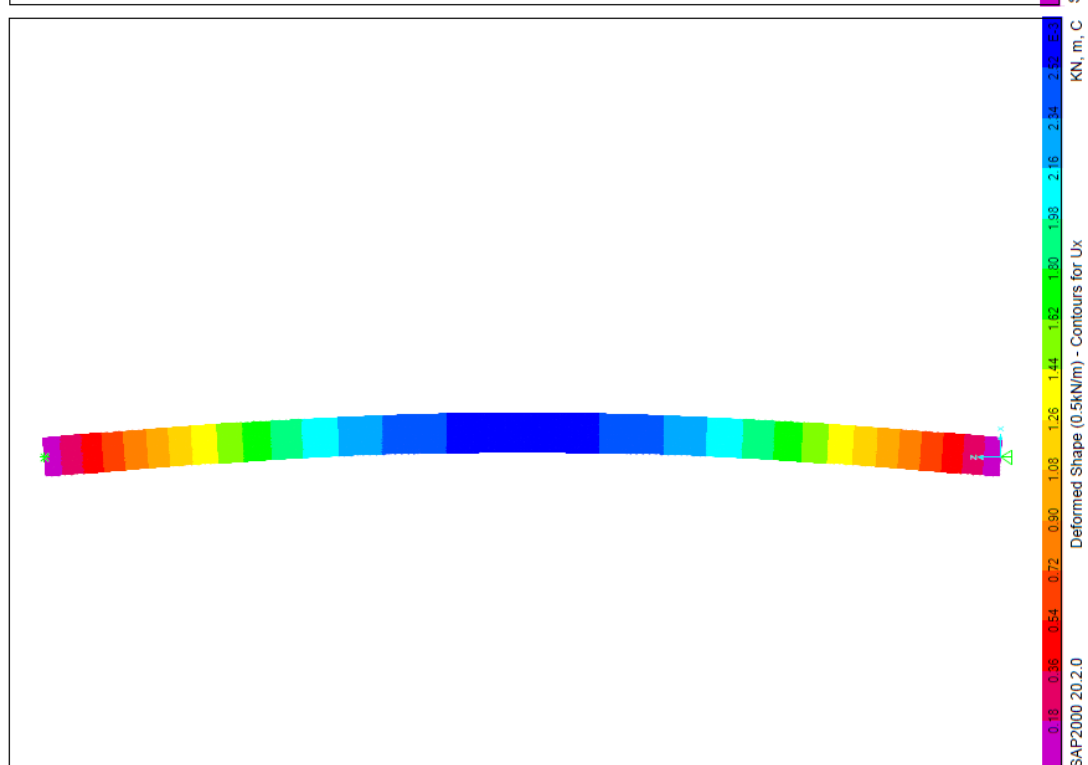
Anexo E – Deformações PGC

Deformação (m) $q = 0,50 \text{ kN/m}$ (até 1,20 m)

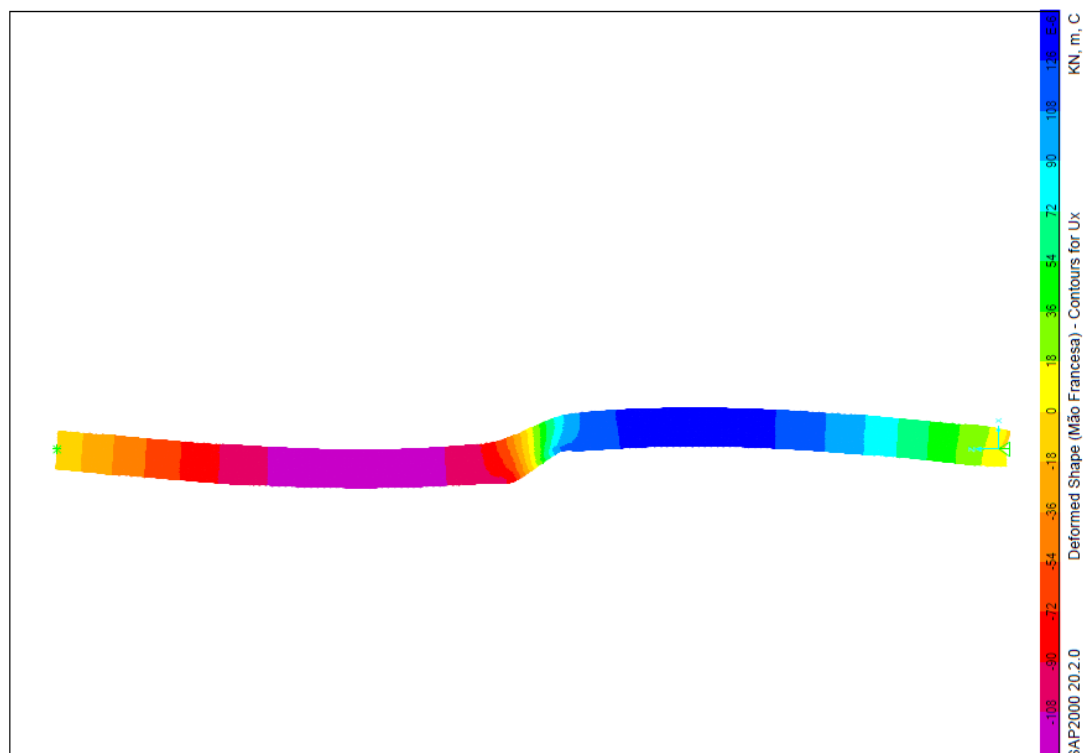


Deformação (m) $P = 0,50 \text{ kN}$



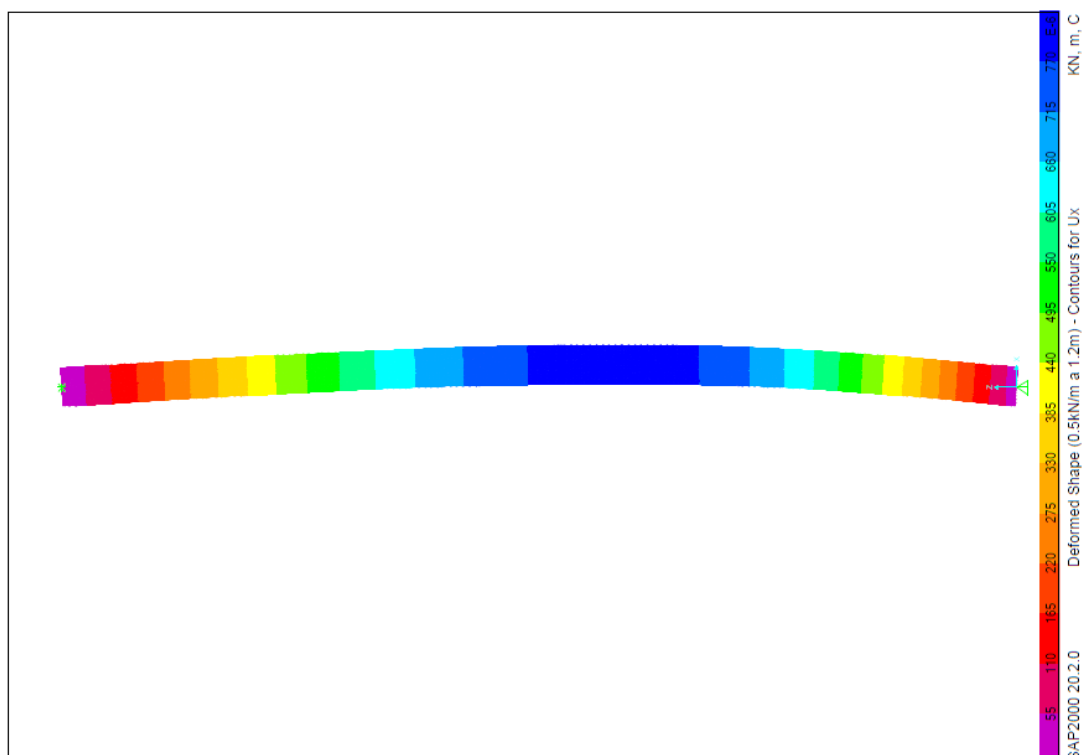
Deformação (m) $q = 0,50 \text{ kN/m}$ 

Deformação (m) Mão-francesa

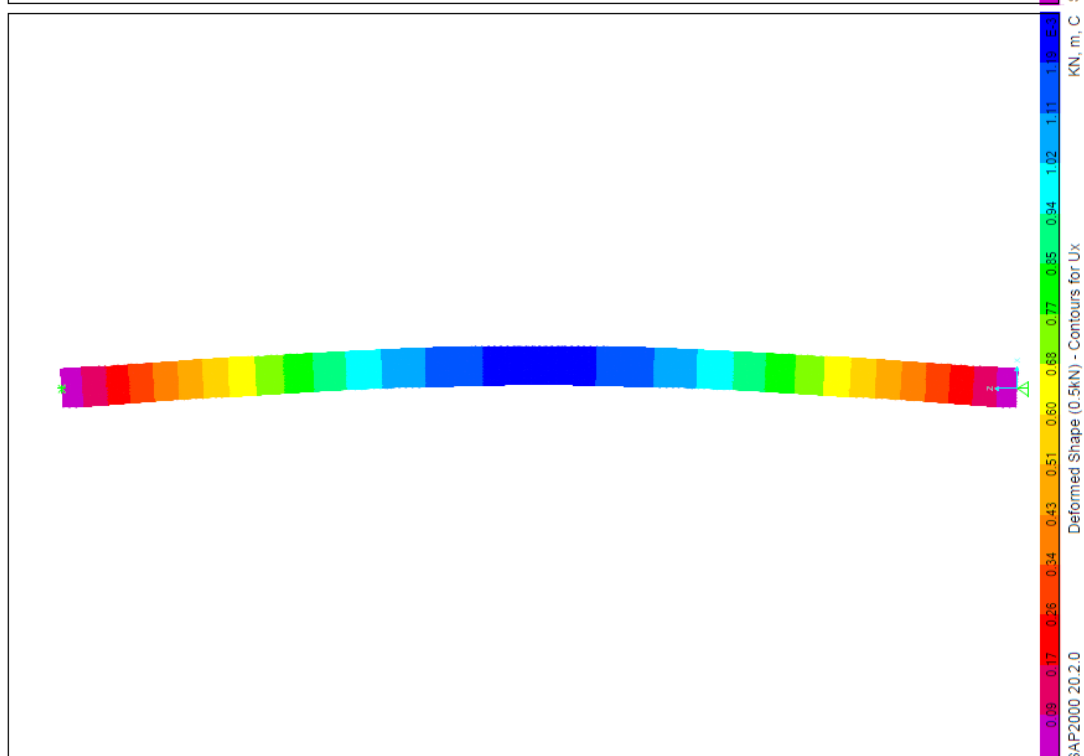


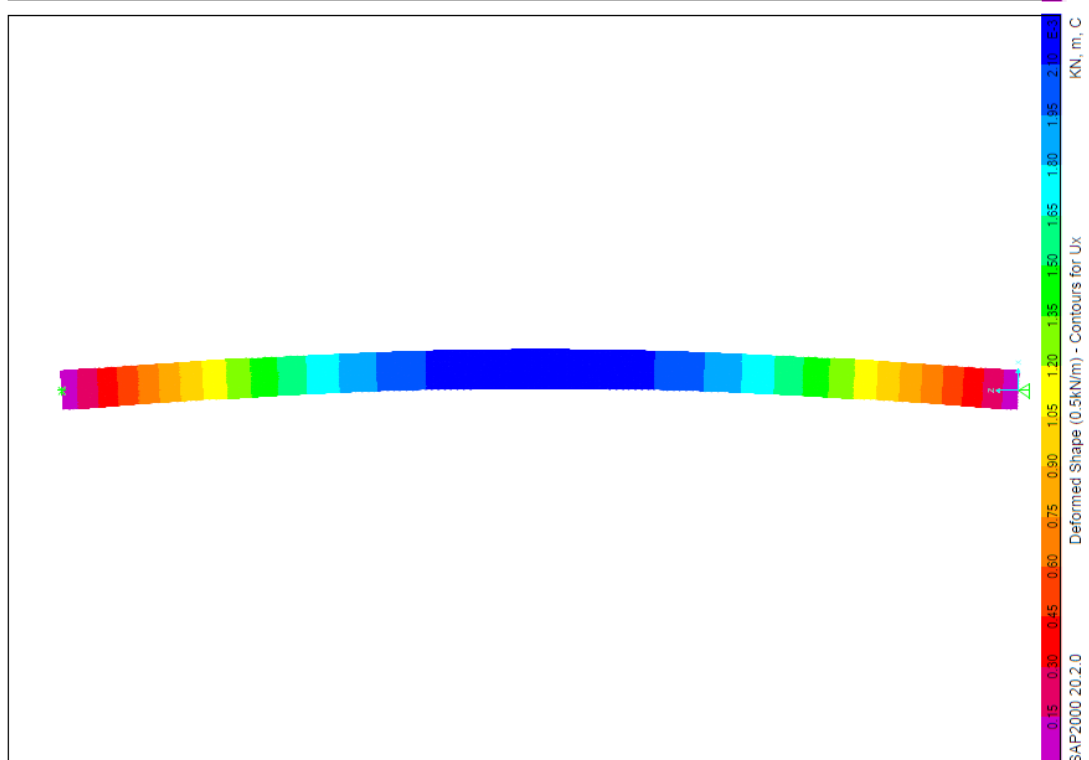
Anexo F – Deformações PMC

Deformação (m) $q = 0,50 \text{ kN/m}$ (até 1,20 m)



Deformação (m) $P = 0,50 \text{ kN}$



Deformação (m) $q = 0,50 \text{ kN/m}$ 

Deformação (m) Mão-francesa

